



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JOÃO LUCAS VILAR DE ANDRADE

**ANÁLISE COMPARATIVA DO CAMPUS AGRESTE WATERSHED MODEL COM
DIFERENTES MODELOS HIDROLÓGICOS PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO
RIO JABOATÃO**

Recife
2024

JOÃO LUCAS VILAR DE ANDRADE

**ANÁLISE COMPARATIVA DO CAMPUS AGRESTE WATERSHED MODEL COM
DIFERENTES MODELOS HIDROLÓGICOS PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO
RIO JABOATÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientador (a): Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho

Recife

2024

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Andrade, João Lucas Vilar de.

Análise comparativa do Campus Agreste Watershed Model com diferentes modelos hidrológicos para a bacia hidrográfica do Rio Jaboatão / João Lucas Vilar de Andrade. - Recife, 2024.

144f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, , Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2024.

Orientação: Artur Paiva Coutinho.

Inclui referências.

1. Modelagem hidrológica; 2. HEC-HMS; 3. CAWM V; 4. NCRRT; 5. Ciclo Hidrológico. I. Coutinho, Artur Paiva. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

JOÃO LUCAS VILAR DE ANDRADE

**ANÁLISE COMPARATIVA DO CAMPUS AGRESTE WATERSHED MODEL COM
DIFERENTES MODELOS HIDROLÓGICOS PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO
RIO JABOATÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE em Engenharia Civil. Área de Concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovada em 02/09/2024

Orientador: Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho - UFPE

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência
Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto (examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência
Prof. Dr. Adilson Pinheiro (examinador externo)
Universidade Federal de Santa Catarina

participação por videoconferência
Prof. Dr. Antônio Celso Dantas Antonino (examinador externo)
Universidade Federal de Pernambuco



Emitido em 06/09/2024

APROVACAO DA BANCA Nº 162/2024 - PPGEC (11.65.18)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 06/09/2024 13:48)

ALFREDO RIBEIRO NETO

PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR

DEPECA (11.65.60)

Matrícula: ###888#1

(Assinado digitalmente em 06/09/2024 15:57)

ANTONIO CELSO DANTAS ANTONINO

PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR

DEPENUC (11.65.50)

Matrícula: ###343#5

Visualize o documento original em <http://sipac.ufpe.br/documentos/> informando seu número: **162**, ano: **2024**, tipo: **APROVACAO DA BANCA**, data de emissão: **06/09/2024** e o código de verificação: **6cd8276d30**

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Giselda Vilar e Jean Costa, que sempre acreditaram e investiram para que eu realizasse diversas conquistas através dos estudos.

Aos meus familiares, em especial a minha madrinha Mirelly Costa e o meu primo Arthur Vilar por todo o suporte e companhia.

Ao meu querido orientador, professor Artur Paiva Coutinho, pelo suporte e orientação, suas ideias foram fundamentais para a concepção deste trabalho.

Ao meu cachorrinho Branquinho, que me acompanha desde 2009. Fico feliz porque você conseguiu presenciar tantas fases da minha vida.

Aos meus queridos amigos, Katia, Larissa, Lucas, Luis e Luiz, por todo apoio e suporte durante tantos momentos.

Aos demais amigos, que sempre torceram por mim.

Aos meus queridos professores do Campus Agreste, obrigado por me ensinar a ser um profissional competente

À UFPE, à CAPES e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, por todo o apoio para a realização deste estudo.

Aos meus avós, que infelizmente não puderam presenciar essa minha conquista, dedico este trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

Modelos hidrológicos são representações simplificadas dos processos hidrológicos atuantes nas bacias hidrográficas, nos quais expressões e variáveis são utilizadas para simular as interações entre a precipitação e a superfície terrestre. Neste contexto, 7 modelos hidrológicos (HEC-HMS, CAWM V, GR4J, GR5J, GR6J, HYMOD e HBV) foram comparados ao simular o escoamento fluvial na Bacia Hidrográfica do Rio Jaboatão, na Zona da Mata do estado de Pernambuco. Esta bacia tem histórico de inundações, destacando-se os eventos de cheia do ano de 2022. O presente estudo realizou um levantamento de dados espaciais, como modelos digitais de terreno e dados de uso e ocupação do solo, que foram avaliados por ferramentas de geoprocessamento para caracterizar a área de estudo. Os dados processados foram utilizados na calibração do modelo para a sub-bacia da Estação Fluviométrica Moreno (Código: 39189560), no qual destaca-se a performance do HEC-HMS, que simulou a vazão a cada 15 minutos em dois cenários de discretização espacial, no qual resultou em um coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe de 0,828 no Modelo Concentrado e 0,819 no Modelo Distribuído por Sub-bacias. O CAWM V foi aplicado para 2 cenários de discretização temporal, diária e 15 minutos. A versão diária resultou NSE de 0,840 enquanto no sub-diário o valor foi 0,76. Ao avaliar os modelos do NCRRT o GR6J obteve NSE de 0,814; GR4J com 0,748 e GR5J com 0,746. As ferramentas de otimização de parâmetros presentes no CAWM garantiram a qualidade estatística dos modelos desenvolvidos.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica; HEC-HMS; CAWM V; NCRRT; Ciclo Hidrológico.

ABSTRACT

Hydrological models are simplified representations of the hydrological processes occurring in watersheds, where expressions and variables are used to simulate the interactions between precipitation and the land surface. In this context, seven hydrological models (HEC-HMS, CAWM V, GR4J, GR5J, GR6J, HYMOD, and HBV) were compared in simulating river flow in the Jaboatão River Basin, located in the Zona da Mata region of Pernambuco, Brazil. This basin has a history of flooding, with notable events occurring in 2022. The present study conducted a survey of spatial data, including digital elevation models and land use and land cover data, which were evaluated using geoprocessing tools to characterize the study area. The processed data were used to calibrate the model for the sub-basin of the Moreno Fluvimetric Station (Code: 39189560), where the performance of HEC-HMS stood out, simulating flow at 15-minute intervals in two spatial discretization scenarios. The model resulted in a Nash-Sutcliffe efficiency coefficient of 0,828 for the Lumped Model and 0,819 for the Sub-basin Distributed Model. The CAWM V model was applied in two temporal discretization scenarios: daily and 15-minute intervals. The daily version resulted in an NSE of 0,840, while the sub-daily version achieved a value of 0,76. Among the NCRRT models, GR6J obtained an NSE of 0,814, GR4J 0,748, and GR5J 0,746. The parameter optimization tools available in CAWM ensured the statistical quality of the developed models.

Keywords: Hydrological Modeling; HEC-HMS; CAWM V; Hydrological cycle.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração de bacias hidrográficas.....	17
Figura 2 - O ciclo da água.	18
Figura 3 - Perfil esquemático dos processos de situação normal, enchente e inundação.....	20
Figura 4 - Comparação entre os hidrogramas de áreas ruais e urbanas	20
Figura 5- Classificação por tipo de discretização de modelos hidrológicos.....	24
Figura 6 - Forma do Hidrograma unitário sintético triangular do SCS.	29
Figura 7 - Fluxograma de trabalho de simulações hidrológicas no HEC-HMS.....	35
Figura 8 - Representação esquemática do modelo CAWM IV.	36
Figura 9 - Representação esquemática do modelo CAWM V.	36
Figura 10 - Interface do NCRRT.....	39
Figura 11 - Estruturas esquemáticas dos modelos do NCRRT.	41
Figura 12 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Jaboatão.....	45
Figura 13 - Mapa de declividade da BHRJ.....	46
Figura 14 - Uso e Ocupação do Solo na BHRJ no ano de 2022.	47
Figura 15 - Mapa pedológico da BHRJ.	48
Figura 16 - Uso e ocupação do solo na sub-bacia Moreno no ano de 2022.	51
Figura 17 - Tipos e grupo hidrológico dos solos da sub-bacia Moreno.	52
Figura 18 - Comparação entre os dados medidos em estações pluviométricas convencionais e telemétricas com passo de tempo de 15 minutos.....	53
Figura 19 - Comparação entre os dados medidos em estações fluviométricas convencionais e telemétricas com passo de tempo de 15 minutos.....	54
Figura 20 - Aplicação dos polígonos de Voronoi para a estimativa das áreas de influência.	55
Figura 21 - Sub-bacia da Estação 39189560.	56
Figura 22 - Série sub-diária da PCD 39189560.....	57
Figura 23 - Série diária da PCD 39189560.....	57
Figura 24 - Levantamento das estações pluviométricas com dados telemétricos nas proximidades da BHRJ.....	58
Figura 25 - Levantamento das estações pluviométricas com dados diários nas proximidades da BHRJ.....	59

Figura 26 – Estação INMET com dados da normal climatológica 1991-2020 selecionada.	60
Figura 27 - Identificação de falhas em séries históricas através do <i>software</i> HIDRO 1.4.	61
Figura 28 - Aplicação do Método da Dupla Massa para a análise de consistência de estações pluviométricas.	63
Figura 29 - Comparação entre MDTs de diferentes resoluções espaciais.	64
Figura 30 - Plataforma MapBiomass.	64
Figura 31 - Definição do sistema de coordenadas do projeto.	66
Figura 32 - Rede de drenagem da GL2 pré-processada.	66
Figura 33 - Delimitação do limite da área de drenagem.	67
Figura 34 - Delimitação do exutório do modelo.	67
Figura 35 – Modelo hidrológico com distribuição por sub-bacias.	68
Figura 36 - Modelo hidrológico concentrado.	68
Figura 37 - Função Associar Atributos por Localização.	71
Figura 38 - Estatística por Categoria.	72
Figura 39 - Pré-configurações do HEC-HMS.	73
Figura 40 - Configurações do componente hidrológico sub-bacia.	74
Figura 41 - Fluxograma de trabalho do CAWM.	77
Figura 42 - Arquivo de entrada do NCRRT.	81
Figura 43 - Modelo distribuído por sub-bacias.	84
Figura 44 - Modelo concentrado.	85
Figura 45 - Hidrograma de cheia do período 01/04/2022 a 31/08/2022 (Calibração).	90
Figura 46 - Hidrograma de vazão no período de 01/01/2015 e 31/12/2022 no Modelo CAWM Diário.	91
Figura 47 - Hidrograma de cheia para os eventos de validação o CAWM Diário: a) Julho/2015, b) Julho/2017, c) Abril/2018 e d) Junho/2019.	93
Figura 48 - Hidrograma do evento Maio/2021 no modelo CAWM Diário.	93
Figura 49 - Hidrograma do ano 2021 no modelo CAWM Diário.	94
Figura 50 - Hidrograma de calibração dos modelos GR4J, GR5J, GR6J e HYMOD.	97
Figura 51 - Hidrograma de calibração do modelo HBV.	97
Figura 52 – Comparação entre os hidrogramas de validação nos diferentes modelos do NCRRT: a) Julho/2017, b) Abril/2018, c) Junho/2019 e d) 2022.	100

Figura 53 - Hidrograma da série histórica completa nos modelos NCRRT.	100
Figura 54 - Comparação entre as vazões observadas e calculadas ao longo da série histórica: a) modelo CAWM, b) modelo GR4J, c) modelo GR5J, e d) modelo GR6J.	103
Figura 55 - Hidrograma de cheia do evento do dia 28/05/2022 (Calibração).	104
Figura 56 - Hidrograma de cheia das sub-bacias no evento do dia 28/05/2022 (Calibração).	106
Figura 57 – Hidrogramas de validação dos modelos HEC-HMS: a) Julho/2015, b) Julho/2017, c) Abril/2018 e d) Junho/2019.	107
Figura 58 - Hidrograma de cheia para o Evento Maio 2021 dos modelos HEC-HMS.	108
Figura 59 - Hidrograma de calibração do modelo CAWM Sub-diário.	109
Figura 60 - Hidrogramas de validação do CAWM Sub-diário nos eventos: a) Julho/2015, b) Julho/2017, c) Abril/2018 e d) Junho/2019.	111
Figura 61 - Hidrogramas do evento Maio/2021 no CAWM Sub-diário.	111
Figura 62 - Comparação entre as vazões observadas e calculadas nos modelos HEC-HMS e CAWM: a) Julho/2015, b) Julho/2017, c) Abril/2018, e d) Junho/2019.	113
Figura 63 - Comparação entre as vazões observadas e calculadas nos modelos HEC-HMS e CAWM: a) Maio/2021, b) 2022 e c) Calibração.	114
Figura 64 - Comparação entre a normal climatológica de evapotranspiração potencial com diferentes modelos.	115
Figura 65 - Comparação entre hidrogramas do CAWM nos cenários: a) Normal Climatológica, b) Penman.	117
Figura 66 - Comparação entre hidrogramas do CAWM nos cenários: a) Penman-Monteith, b) FAO-56.	118
Figura 67 - Comparação entre hidrogramas do CAWM nos cenários: a) Blaney-Criddle, b) Hargreaves.	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Dados de prejuízos devido a eventos de alagamentos, enxurradas, inundações, movimento de massa e chuvas intensas nos municípios localizados na BHRJ entre os anos de 1995 e 2023.	21
Tabela 2 - Dados de prejuízos devido a eventos de alagamentos, enxurradas, inundações, movimento de massa e chuvas intensas nos municípios localizados na BHRJ no ano 2022.	21
Tabela 3 - Valores de CN para áreas urbanas e suburbanas.	26
Tabela 4 - Características e validade das expressões com menor erro avaliadas por Silveira (2005).	30
Tabela 5 - Componentes hidrológicos simulados no modelo HEC-HMS.	33
Tabela 6 - Processos hidrológicos simulados em cada elemento do modelo HEC-HMS.	34
Tabela 7 – Descrição dos parâmetros dos modelos conceituais do NCRRT.	39
Tabela 8 – Indicadores de performance recomendados para simulações.	43
Tabela 9 - Quantitativo do Uso e Ocupação do solo na BHRJ.	47
Tabela 10 - Classes dos solos presentes na BHRJ.	48
Tabela 11 – Dados demográficos dos municípios situados na BHRJ.	49
Tabela 12 - População total da BHRJ.	50
Tabela 13 - Quantitativo do Uso e Ocupação do solo na Sub-bacia Moreno.	51
Tabela 14 - Classes dos solos presentes na Sub-bacia Moreno.	52
Tabela 15 - Áreas dos grupos hidrológicos da Sub-bacia Moreno.	52
Tabela 16 - Estação fluviométrica selecionada.	55
Tabela 17 - Estações pluviométricas selecionadas.	58
Tabela 18 – Médias mensais da normal climatológica de evapotranspiração Potencial da Estação Recife (Curado).	60
Tabela 19 - Classificação hidrológica do solo para as condições brasileiras.	70
Tabela 20 - Processos Hidrológicos adotados para as sub-bacias.	75
Tabela 21 - Valores de coeficiente de rugosidade para canais abertos.	75
Tabela 22 - Parâmetros de entrada do modelo CAWM.	78
Tabela 23 - Intervalos recomendados para as variáveis do modelo CAWM.	79
Tabela 24 - Evapotranspiração Potencial a cada 15 minutos da Estação Recife (Curado).	80

Tabela 25 - Médias mensais da Normal Climatológica utilizada.	81
Tabela 26 - Metodologias e dados de entradas utilizados para a estimativa de evapotranspiração potencial utilizados.....	83
Tabela 27 - Características morfométricas das sub-bacias.....	85
Tabela 28 - Eventos analisados nos modelos sub-diários.	86
Tabela 29 - Eventos analisados nos modelos diários.	87
Tabela 30 - Parâmetros de entrada dos modelos CAWM.	87
Tabela 31 - Parâmetros calibrados no modelo CAWM V Diário.....	88
Tabela 32 - Parâmetros calibrados no modelo CAWM IV.	88
Tabela 33 - Indicadores de performance estatística do modelo CAWM Diário.	90
Tabela 34 - Balanço hídrico da sub-bacia Moreno entre os anos de 2015 e 2022 no Modelo CAWM Diário.....	91
Tabela 35 - Métricas estatísticas da simulação global do Modelo CAWM Diário.....	92
Tabela 36 - Desempenho estatístico da validação do modelo CAWM Diário.....	92
Tabela 37 - Parâmetros calibrados dos modelos GR4J, GR5J e GR6J.....	95
Tabela 38 - Parâmetros calibrados do modelo HYMOD.	96
Tabela 39 - Parâmetros calibrados do modelo HBV	96
Tabela 40 - Indicadores de performance estatística da calibração dos modelos disponíveis no NCRRT.....	96
Tabela 41 - Indicadores de performance estatística da validação dos modelos disponíveis no NCRRT.....	98
Tabela 42 - Indicadores de performance estatística dos modelos diários avaliados nos mesmos cenários.	101
Tabela 43 - Performance estatística dos modelos distribuídos e concentrados do HEC-HMS.....	105
Tabela 44 - Volume precipitado, de perdas e escoado por sub-bacia.....	105
Tabela 45 - Desempenho estatístico da validação dos modelos HEC-HMS.....	106
Tabela 46 - Parâmetros calibrados no modelo CAWM Sub-diário.	109
Tabela 47 - Indicadores de performance estatística da calibração do modelo CAWM Sub-diário.....	110
Tabela 48 - Desempenho estatístico da validação do modelo CAWM Sub-diário...	110
Tabela 49 - Indicadores de performance estatística dos modelos sub-diários avaliados nos mesmos cenários.	112

Tabela 50 - Médias diárias de evapotranspiração potencial avaliadas no CAWM V.
.....115

Tabela 51 - Balanço Hídrico do CAWM em diferentes cenários de evapotranspiração
potencial.....116

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
CAWM	<i>Campus Agreste Watershed Model</i>
CN	<i>Curve Number</i>
HBV	<i>Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning</i>
HYMOD	<i>Hybrid Model</i>
GR4J	<i>Génie Rural à 4 Paramètres Journalier</i>
GR5J	<i>Génie Rural à 5 Paramètres Journalier</i>
GR6J	<i>Génie Rural à 6 Paramètres Journalier</i>
HEC-HMS	<i>Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDW	<i>Inverse Distance Weight</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MDT	Modelo Digital de Terreno
NCRRT	<i>Nonstationary Conceptual Rainfall Runoff Toolbox</i>
NRCS	<i>Natural Resources Conservation Service</i>
NSE	Coeficiente de Desempenho de Nash-Sutcliffe
PBIAS	<i>Percent Bias</i>
PE3D	Pernambuco Tridimensional
QGIS	<i>Quantum Geographic Information System</i>
RMR	Região Metropolitana do Recife
RMSE	<i>Root Mean Squared Error</i>
RSR	<i>Root Mean Standard Deviation Ratio</i>
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS.....	16
2.1 OBJETIVO GERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
3.1 HIDROLOGIA DE SUPERFÍCIE	17
3.1.1 Bacia Hidrográfica.....	17
3.1.2 Processos hidrológicos.....	18
3.1.3 Inundações em Bacias Urbanas	19
3.1.4 Inundações Na Bacia Hidrográfica Do Rio Jaboatão	20
3.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA	22
3.2.1 Precipitação Média.....	24
3.2.2 SCS-Curve Number	25
3.2.3 Hidrograma Unitário.....	28
3.2.4 Propagação de Vazão em Canais Naturais	31
3.3 MODELOS HIDROLÓGICOS	33
3.3.1 HEC-HMS.....	33
3.3.2 CAMPUS AGRESTE WATERSHED MODEL - CAWM	35
3.3.3 Nonstationary Conceptual Rainfall Runoff Toolbox - NCRRT	38
3.4 MÉTRICAS ESTATÍSTICAS.....	41
4 METODOLOGIA	44
4.1 ÁREA DE ESTUDO	44
4.1.1 Bacia Hidrográfica do Rio Jaboatão	44
4.1.2 Sub-Bacia da Estação 39189560	50
4.2 COLETA E TRATAMENTO DE DADOS HIDROLÓGICOS.....	53
4.2.1 Coleta de dados.....	53
4.2.2 Dados Fluviométricos	55
4.2.3 Dados Pluviométricos.....	57
4.2.4 Dados de evapotranspiração potencial.....	59
4.2.5 Preenchimento de falhas pelo método do inverso da distância	61
4.2.6 Análise de Consistência pelo método da Dupla Massa.....	62
4.3 COLETA E PRÉ-PROCESSAMENTO DE DADOS ESPACIAIS	63

4.3.1 Base de dados espaciais	63
4.3.2 Uso e ocupação do solo	64
4.3.3 Mapa Pedológico	65
4.3.4 Pré-processamento da rede de drenagem	65
4.4 CÁLCULO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA DOS MODELOS HIDROLÓGICOS	68
4.4.1 Tempo de concentração e <i>Lagtime</i>	69
4.4.2 Cálculo do Curve Number, Parâmetro S e Abstração inicial.....	69
4.5 PLANO DE TRABALHO DOS MODELOS HIDROLÓGICOS.....	72
4.5.1 Modelagem no HEC-HMS.....	72
4.5.1.1 Pré-configuração do programa.....	73
4.5.1.2 Modelos de bacia, Modelos meteorológicos e Elementos Compartilhados...	73
4.5.1.3 Processos Hidrológicos	74
4.5.1.4 Especificações de Controle e Simulação	76
4.5.1.5 Calibração e validação no HEC-HMS.....	76
4.5.2 Modelagem no CAWM.....	76
4.5.2.1 Dados de entrada do modelo	78
4.5.2.2 Calibração e validação do modelo CAWM	78
4.5.2.3 Ajuste para simulações sub-diárias no CAWM.....	79
4.5.3 Modelagem no NCRRT	80
4.5.3.1 Dados de entrada dos modelos.....	80
4.5.3.2 Calibração dos modelos do NCRRT	82
4.6 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO CAWM EM DIFERENTES METODOLOGIAS DE ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL	82
4.6.1 Estimativa de evapotranspiração potencial com o <i>pyet</i>	82
4.6.2 Adaptação do CAWM para diferentes metodologias de evapotranspiração potencial	83
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	84
5.1 CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO	84
5.2 CALIBRAÇÃO DOS MODELOS HIDROLÓGICOS.....	86
5.2.1 Eventos analisados	86
5.2.2 Calibração do modelo CAWM Diário	87
5.2.2.1 Validação do modelo CAWM V Diário	92
5.2.3 Calibração dos modelos do NCRRT	95

5.2.3.1 Validação dos modelos do NCRRT	98
5.2.4 Comparação de desempenho entre os modelos diários GR e CAWM V .	101
5.2.5 Calibração dos modelos HEC-HMS	103
5.2.5.1 Validação dos modelos HEC-HMS.....	106
5.2.6 Calibração do modelo CAWM Sub-diário.....	108
5.2.6.1 Validação do modelo CAWM Sub-diário	110
5.2.7 Comparação de desempenho entre os modelos sub-diários.....	112
5.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL NO MODELO CAWM V.....	114
6 CONCLUSÕES	120
REFERÊNCIAS.....	123

1 INTRODUÇÃO

O século XX foi marcado pelo rápido crescimento populacional. No Brasil, esse fenômeno se manifestou através de uma urbanização intensificada e desordenada, com um aumento da população urbana de cerca de 31% em 1940 para aproximadamente 84% em 2010, conforme dados do IBGE (2017). A ocupação desordenada das cidades, impulsionada pela necessidade de acomodar a crescente população, resultou na expansão das áreas impermeáveis, comprometendo o ciclo hidrológico ao restringir a infiltração natural da água no solo devido à expansão das áreas impermeáveis.

A expansão dessas superfícies impermeáveis, limita significativamente a infiltração da água da chuva, alterando o comportamento hidrológico das bacias urbanas. Isso resulta em um aumento substancial do escoamento superficial, que evidencia os problemas como inundações, deslizamentos e a degradação dos recursos hídricos (COUTINHO, 2011). Durante eventos de chuva intensa, a resposta das bacias urbanas é rápida e acentuada, já que a baixa infiltração gera um grande volume de escoamento em um curto período, sobrecarregando os sistemas de drenagem, muitas vezes mal preparados para essa demanda (MIGUEZ & MASCARENHAS, 2019).

Compreender a dinâmica do escoamento superficial em bacias urbanas é, portanto, fundamental para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos nessas áreas. O sucesso de estratégias de manejo de águas pluviais está diretamente ligado ao entendimento detalhado dos processos hidrológicos que ocorrem nas cidades. Tucci (1995) destaca que, além de lidar com chuvas intensas, é essencial considerar as interações complexas entre os padrões de precipitação e as características das bacias, que influenciam a formação e a magnitude do escoamento superficial.

Nesse cenário, os modelos hidrológicos são ferramentas indispensáveis para simular e prever o comportamento das bacias hidrográficas. Segundo Darbandsari e Coulibaly (2020), tal simplificação consiste no uso de reservatórios para representar os processos globais, ou semidistribuídos, de fluxo e armazenamento de água no sistema. Sendo possível, teoricamente, simular todo o regime hidrológico mantendo as memórias e condições anteriores ao momento simulado (DANG; CHOWDHURY; GALELLI, 2020), no entanto, os processos representados, não correspondem claramente a uma realidade física da bacia hidrográfica.

Essa lógica de funcionamento é aplicada em modelos como: HEC-HMS (USACE), GR4J (PERRIN *et al.*, 2003), GR5J (LE MOINE, 2008), GR6J (PUSHPALATHA *et al.*, 2011), HyMod (BOYLE *et al.*, 2000; GHARARI *et al.*, 2013), HBV (AGHAKOUCHAK; HABIB, 2010). Contudo, são escassos na literatura as aplicações desses modelos para regiões tropicais, que possuem clima caracterizado por altas taxas de precipitação concentrada em curtos períodos, gera altos índices de escoamento superficial (BARBERO *et al.*, 2019; WASKO *et al.*, 2021).

Dentro desse contexto, o CAMPUS AGRESTE WATERSHED MODEL (CAWM), desenvolvido por Cirilo *et al.* (2021), foi projetado especificamente para bacias em regiões de clima semiárido e posteriormente para bacias úmidas. O desenvolvimento de modelos como o CAWM representa um avanço significativo na modelagem hidrológica dessas áreas, proporcionando uma compreensão mais apurada dos processos hidrológicos locais. A análise de desempenho entre diferentes modelos permite identificar qual o mais adequado para aplicação da bacia em estudo (SEZEN *et al.*, 2019). Visto que, diferentes abordagens podem apresentar resultados diferentes na tentativa de representar a transformação da precipitação em escoamento (HORTON; SCHAEFLI; KAUZLARIC, 2022).

Além disso, a análise da dinâmica hidrológica deve considerar diferentes escalas temporais de precipitação. A avaliação de eventos de curta duração, como chuvas intensas, ou de longa duração, como períodos prolongados de chuva, é essencial para captar a resposta total da bacia (PAIVA *et al.*, 2024). Diferentes escalas temporais permitem avaliar como os modelos reagem às variações na intensidade e distribuição das chuvas, fornecendo informações valiosas sobre a sensibilidade dos parâmetros hidrológicos.

Portanto, este estudo visa avaliar e comparar o desempenho do CAWM com outros modelos hidrológicos amplamente utilizados, como o GR4J, GR5J, GR6J, HEC-HMS, HBV e Hymod, em simulações hidrológicas na Bacia do Rio Jaboaão. Localizada em uma região tropical e com elevados índices pluviométricos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a performance de diferentes modelos hidrológicos para diferentes escalas de tempo e discretização espacial para a Bacia Hidrográfica do Rio Jaboatão, em Pernambuco.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Coletar e consolidar um conjunto abrangente de dados sobre a Bacia Hidrográfica do Rio Jaboatão;
- Calibrar e validar modelos chuva-vazão da área de estudo no HEC-HMS, CAWM V, GR4J, GR5J, GR6J, HYMOD e HBV;
- Comparar o CAWM com diferentes modelos hidrológicos em eventos com discretização temporal diária e sub-diária;
- Comparar o desempenho entre modelos concentrados e distribuídos no HEC-HMS;
- Avaliar a sensibilidade do CAWM em diferentes estimativas de evapotranspiração potencial.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

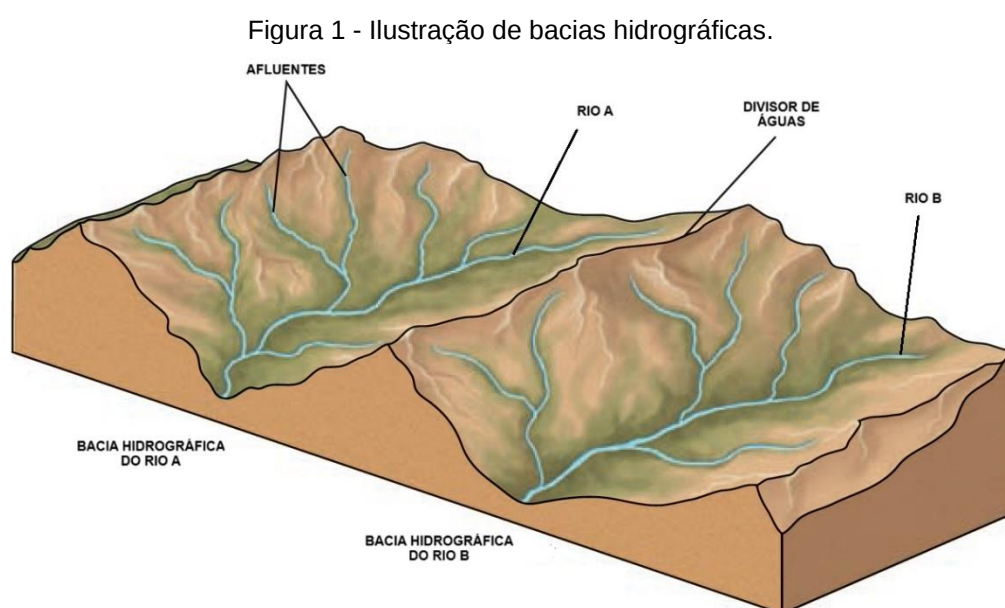
Este capítulo aborda os conceitos estabelecidos na literatura acerca dos temas: hidrologia básica, modelagem hidrológica, inundações urbanas e validação estatística.

3.1 HIDROLOGIA DE SUPERFÍCIE

3.1.1 Bacia Hidrográfica

Segundo a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) (BRASIL, 1997), bacia hidrográfica é a unidade fundamental da gestão dos recursos hídricos. Já na concepção de Tucci (1995), bacias hidrográficas são áreas de captação natural de precipitação, convergindo o fluxo d'água para um único ponto de saída, denominado de exutório, composto de superfícies vertentes e uma rede de drenagem interconectada.

Segundo a visão de Rocha e Kurts (2001), as bacias hidrográficas drenam as águas precipitadas por meio de canais, afluentes e tributários para um curso principal que converge para uma única saída, seja ela o oceano, mar, lago etc. Conforme a Figura 1, os divisores de fluxos delimitam as fronteiras entre as bacias hidrográficas.

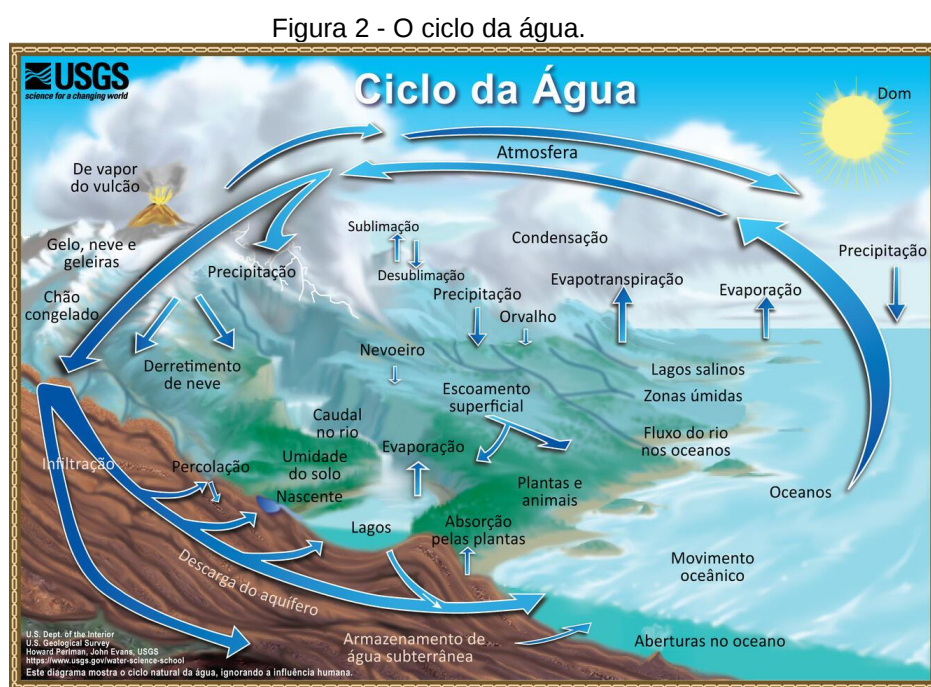


Fonte: Adaptada de World Rivers (2020).

Ademais, Tucci (1995), considera que as bacias hidrográficas são sistemas físicos fechados, em que o balanço hídrico referente à entrada de água por meio de fenômenos de precipitação e saída por meio do fluxo fluvial e evapotranspiração é equilibrado

3.1.2 Processos hidrológicos

A água, elemento fundamental para a vida na Terra e importante componente da manutenção do clima do planeta, está em constante movimento. O conjunto de fenômenos que descreve esta movimentação é chamado de Ciclo Hidrológico. Segundo USGS (2019), não há um ponto de partida nesse circuito devido à complexidade dos processos (Figura 2).



Fonte: USGS (2019).

Camargo e Camargo (2000) realizaram uma revisão analítica da evapotranspiração, descrevendo que o fenômeno ocorre quando a água é convertida do estado líquido para o gasoso (vapor) devido a presença de uma fonte de energia (radiação solar). A transferência da água para a atmosfera pode ser classificada como evaporação quando oriunda dos oceanos, rios, lagos e solo e transpiração das plantas (RODRIGUES, 2017). A atmosfera é o receptor desses vapores, condensando-os em

nuvens que são transportadas por meio das correntes de ar. Devido a diversos fatores, a água das nuvens pode precipitar de diferentes formas como chuva, granizo, neve etc.

Quando a água da precipitação atinge a superfície, ela pode seguir uma variedade de rotas. Uma porção dessa água se infiltra no solo, contribuindo para a recarga dos aquíferos (SILVA, 2000). Simultaneamente, outra parcela flui sobre a superfície, dando origem a rios e lagos que, por fim, deságuam nos oceanos (COSTA, 2005).

Santos (2023) diz que os diversos componentes do ciclo hidrológico estão interligados de maneira complexa, que se influenciam entre si de maneira distinta a depender de cada bacia analisada.

3.1.3 Inundações em Bacias Urbanas

Denomina-se inundação quando a água que escoar na rede de drenagem (rios, riachos e outros cursos d'água) extravasa o leito de escoamento quando a capacidade de transporte destes é superada (TUCCI, 2006). Logo, inundação urbana é o extravasamento dos cursos d'água em áreas urbanizadas, ocupando moradias, ruas, rodovias, comércio, indústrias entre outros.

De acordo com Tucci (2008), os canais naturais possuem dois leitos: o menor por onde ocorre o escoamento na maior parte do tempo, e o maior. A inundação ocorre quando a vazão é suficiente para invadir a planície de inundação, conforme ilustrado na Figura 3.

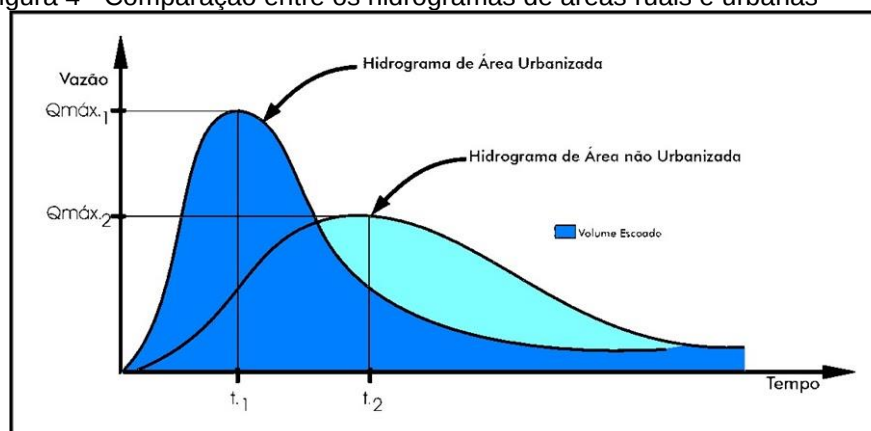
Figura 3 - Perfil esquemático dos processos de situação normal, enchente e inundação.



Fonte: Cemaden (2016)

O crescimento urbano junto com o aumento das áreas impermeáveis aumenta a frequência e intensidade dos eventos de enchentes e inundações. Conforme Tucci (2008), há um aumento das vazões máximas (Figura 4), aumento do transporte de sedimentos e resíduos sólidos, comprometimento da qualidade d'água.

Figura 4 - Comparação entre os hidrogramas de áreas rurais e urbanas



Fonte: Possas (2011)

3.1.4 Inundações Na Bacia Hidrográfica Do Rio Jaboatão

A Bacia hidrográfica do Rio Jaboatão (BHRJ), localizada no leste do estado de Pernambuco, é caracterizada por elevados índices pluviométricos. Há diversos registros de alagamentos, enchentes e inundações, que ocorrem devido à ocorrência de eventos hidrológicos extremos.

Conforme os dados do Atlas Digital de Desastres no Brasil (MDR, 2024), foram registradas, entre os anos de 1995 e 2023, cerca de 880 ocorrências de eventos como

alagamentos, enxurradas, inundações, movimento de massa e chuvas intensas; com 285 óbitos, 543,16 mil desabrigados e desalojados, e Prejuízos de R\$ 3,85 bilhões. Os dados referentes aos municípios localizados na BHRJ estão presentes na Tabela 1.

Tabela 1-Dados de prejuízos devido a eventos de alagamentos, enxurradas, inundações, movimento de massa e chuvas intensas nos municípios localizados na BHRJ entre os anos de 1995 e 2023.

MUNICÍPIOS	OCORRÊNCIAS	DESABRIGADOS	PREJUÍZOS
Cabo de S. Agostinho	9	5.577	R\$ 13,58 milhões
Jaboatão dos Guararapes	20	113.705	R\$ 486,35 milhões
Moreno	11	3.068	R\$ 7,15 milhões
Recife	11	9.602	R\$ 15,24 milhões
São Lourenço da Mata	7	13.665	R\$ 76,57 milhões
Vitória de Santo Antão	4	14.470	R\$ 19,90 milhões

Fonte: MDR (2024).

Durante o ano de 2022, principalmente entre os meses de maio e junho, foram registrados elevados índices pluviométricos nas redondezas da BHRJ. De acordo com Marengo *et al.* (2023), foi observado um total de 551mm de precipitação entre os dias 25 e 30 de maio de 2022.

O curso do Rio Jaboaão cruza as áreas urbanas dos municípios de Moreno e Jaboaão dos Guararapes, sendo o último o mais densamente populoso. Para os eventos do ano de 2022, foram registrados 100.019 desabrigados neste município (Tabela 2).

Tabela 2 - Dados de prejuízos devido a eventos de alagamentos, enxurradas, inundações, movimento de massa e chuvas intensas nos municípios localizados na BHRJ no ano 2022.

MUNICÍPIOS	OCORRÊNCIAS	DESABRIGADOS	PREJUÍZOS
Cabo de S. Agostinho	2	1,166	R\$ 0,00
Jaboatão dos Guararapes	7	100.019	R\$ 434,30 milhões
Moreno	5	937	R\$ 0,61 milhões
Recife	1	4.705	R\$ 7,01 milhões
São Lourenço da Mata	2	1.624	R\$ 1,99 milhões
Vitória de Santo Antão	-	-	-

Fonte: MDR (2024).

De acordo com o levantamento da População em áreas de risco do Brasil realizado pelo IBGE (2018) com base nos dados do Censo 2010, na Região Nordeste o Estado de Pernambuco possui a segunda maior população residente em tais áreas. Destacando-se os Municípios do Recife e Jaboatão dos Guararapes, com 206.761 e 188.026 habitantes em zonas de risco respectivamente, correspondendo a 13,4% e 29,1% da população total.

O estudo realizado pelo IBGE (2018, p. 12), “A área de risco é a área passível de ser atingida por fenômenos ou processos naturais e/ou induzidos que causem efeito adverso. As pessoas que habitam essas áreas estão sujeitas a danos à integridade física, perdas materiais e patrimoniais”.

3.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA

Modelos são simplificações parametrizadas de fenômenos da natureza. Segundo Tucci (2005), os modelos são desenvolvidos para representar sistemas com objetivo de facilitar a sua compreensão, sendo possível identificar as variáveis e componentes atuantes. Conforme Renó e Soárez (2000), a modelagem hidrológica é uma ferramenta que representa matematicamente o fluxo de água e seus constituintes na superfície terrestre ou em outros meios, por exemplo o solo.

Segundo Chaves (2023), os modelos hidrológicos são ferramentas que permitem avaliar o comportamento de fenômenos tais como precipitação, perdas (interceptação, armazenamento superficial e infiltração), o fluxo superficial e a propagação das vazões nos rios.

Conforme Cruz (2012), os modelos hidrológicos calculam a produção de água na bacia por meio de funções matemáticas, enquanto a calibração e validação dos resultados é realizada por meio de comparações com resultados medidos em campo, em estações fluviométricas.

Conforme Santos (2023), os modelos hidrológicos Chuva-Vazão são estruturados pelos seguintes elementos:

- 1) **Discretização da bacia hidrográfica:** é o critério de subdivisão espacial para representação da bacia (

2) Figura 5). Sendo:

- Concentrado: são modelos que representam a bacia como uma única entidade, ou seja, é calculada a média das variáveis para dentro da área da bacia, como por exemplo a chuva média;
- Distribuído por sub-bacias: a bacia é dividida em sub-bacias e cada uma possui suas características;
- Distribuído por módulos: subdivisões por células com parâmetros hidrológicos definidos para a sua área correspondente.

3) **Variáveis de entrada:**

- Precipitação: principal variável de entrada. Os dados pluviométricos possuem limitações quanto ao tamanho das séries, distribuição espacial, presença de falhas e inconsistência dos dados;
- Evapotranspiração: entrada por meio de dados meteorológicos. A depender da disponibilidade, os valores podem ser estimados por meio de estações próximas.

4) **Estrutura básica:**

- Bacia: elemento básico no qual o escoamento e balanço hídrico das sub-bacias é calculado;
- Canal: elemento no qual o escoamento superficial dos canais é estimado, além da propagação da vazão de montante.

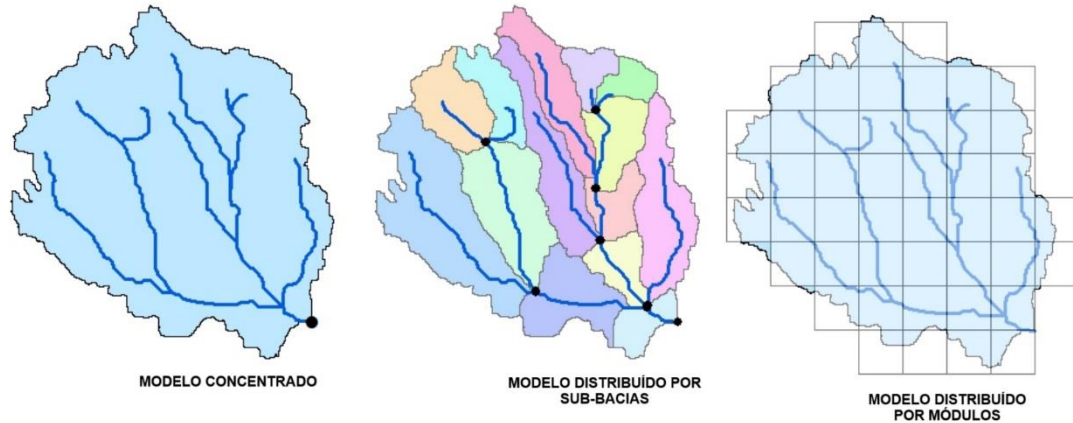
5) **Coleta de dados das características físicas da bacia:**

- Dados que descrevem diversas características locais, tais como tipo de solo, cobertura, relevo etc. Essas informações são obtidas por meio de ferramentas de geoprocessamento.

6) **Determinação dos parâmetros:**

- Algumas variáveis não podem ser medidas diretamente, logo elas são estimadas e ajustadas com base nos dados de entrada e características físicas da bacia.

Figura 5- Classificação por tipo de discretização de modelos hidrológicos.



Fonte: Adaptada de Sitterson *et al.*, (2017).

3.2.1 Precipitação Média

Segundo Chaves (2023), os dados de chuva obtidos das estações pluviométricas representam o valor medido no ponto exato do posto, logo é necessário realizar interpolações para gerar a malha de precipitações e consequentemente a chuva média correspondente à área da bacia.

Conforme Barbalho *et al.* (2011), diversas ferramentas foram desenvolvidas para estimar a precipitação de uma área a partir de dados pontuais. O método do Inverso da Distância ao Quadrado (IDW), desenvolvido por Wei e McGuinness (1973), assume que a precipitação de qualquer ponto da bacia pode ser estimada através de n valores medidos em n postos, sendo o valor ponderado pelo inverso da distância ao quadrado. Dessa forma, as estações mais próximas ao ponto terão maior influência no resultado.

O valor precipitado em um determinado ponto será determinado pela Equação 1:

$$P_j = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{p_i}{d_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2}} \quad (1)$$

Sendo:

- p_j é o total precipitado no ponto j;
- p_i é o valor precipitado no posto i;
- d_i a distância entre o ponto j e o posto i.

3.2.2 SCS-Curve Number

Há diversos fatores que contribuem para nem todo o volume precipitado seja convertido em escoamento superficial, como a infiltração d'água no solo, retenção vegetação e superficial etc. (CHAVES, 2023).

Este estudo irá abordar o modelo *SCS-Curve Number* (CN), criado pelo *Soil Conservation Service* (SCS) (atualmente chamado de NRCS – *Natural Resources Conservation Service*). Conforme Pezan (2022), este método é bastante popular devido a sua grande aplicabilidade para estimar a precipitação efetiva e o volume escoado em um determinado evento chuvoso a partir de simples parâmetros, como o uso e ocupação do solo e suas características hidrológicas.

Logo, o CN retrata dois extremos de escoamento, uma superfície com baixa capacidade de escoamento (e alta capacidade de infiltração) e outra com alta capacidade (e impermeável).

SCS (1972) classificou os tipos de solos de acordo com seus grupos hidrológicos, sendo:

- **Solos A:** Solos com baixa capacidade de escoamento e altas taxas de infiltração. Solos arenosos com pouca porcentagem de argila e silte;
- **Solos B:** Solos com taxa de infiltração moderada e maior capacidade de escoamento em relação ao grupo de solos A. Solos arenosos menos profundos;
- **Solos C:** Solos com baixas taxas de infiltração e capacidade de escoamento acima da média. Solos pouco profundos com porcentagens consideráveis de argila e silte;
- **Solos D:** Solos pouco profundos com baixa capacidade de infiltração e alto escoamento superficial. Solos com mais de 40% de argila.

Os valores médios de CN para diferentes tipos de coberturas e grupos hidrológicos de solo são representados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores de CN para áreas urbanas e suburbanas.

Utilização ou cobertura do solo	Grupo hidrológico de solos			
	A	B	C	D
Zonas cultivadas sem conservação do solo	72	81	88	91
Zonas cultivadas com conservação do solo	62	71	78	81
Pastagens ou terrenos em más condições	68	79	86	89
Terrenos baldios em boas condições	39	61	74	80
Prado em boas condições	30	58	71	78
Bosques ou zonas com cobertura ruim	45	66	77	83
Floresta com cobertura boa	25	55	70	77
Zonas comerciais e de escritórios	89	92	94	95
Zonas industriais	81	88	91	93
Zonas residenciais	77	85	90	92
Parques de estacionamento, telhados, viadutos etc.	98	98	98	98
Vias asfaltadas e com drenagem de águas pluviais	98	98	98	98
Arruamentos em paralelepípedos	76	85	89	91
Terra exposta	72	82	87	89

Fonte: Tucci (1993).

A metodologia proposta pela SCS-CN baseia-se na Equação do Balanço Hídrico (Equação 2):

$$P = I_a + F + P_e \quad (2)$$

Sendo:

- P a precipitação total, em mm;
- I_a a abstração inicial, em mm;
- F a infiltração pós início do escoamento, em mm;
- P_e a precipitação efetiva, em mm.

Duas condições de contorno foram aplicadas à equação do balanço hídrico. Sendo a primeira que a razão entre o volume escoado com o total precipitado é igual a razão entre o total infiltrado e a retenção máxima potencial (Equação 3) (MISHRA; SINGH, 2013):

$$\frac{P_e}{P} = \frac{F}{S} \quad (3)$$

Em que S é a capacidade máxima de armazenamento d'água, em mm.

Contudo, a parcela de perdas não é considerada na Equação 3 (interceptação, armazenamento superficial e infiltração) que ocorrem antes do início do escoamento (I_a) (PEZAN, 2022). Portanto, quando as perdas iniciais forem diferentes de 0, a Equação 3 é reescrita como (Equação 4):

$$\frac{P_e}{P - I_a} = \frac{F}{S} \quad (4)$$

A segunda condição de contorno diz que há uma relação linear entre a I_a e S . Segundo dados experimentais, essa relação é apresentada na Equação 5:

$$I_a = 0,2 * S \quad (5)$$

Hawkins *et al.* (2009), relacionou o CN médio das bacias com o parâmetro S (Equação 6), por meio de experimentos em diversas bacias rurais nos Estados Unidos.

$$S = 254 * \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (6)$$

Portanto, ao combinar as Equações 2 e 4 é possível determinar a precipitação efetiva (Equação 7):

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (7)$$

Ou (Equação 8):

$$P_e = \frac{(P - 0,2 * S)^2}{P + 0,8 * S} \quad (8)$$

Observa-se que haverá precipitação efetiva, e consequentemente escoamento superficial, apenas quando o volume precipitado superar o valor da abstração inicial.

3.2.3 Hidrograma Unitário

O hidrograma representa a evolução da vazão ao longo do tempo. Segundo Cunha *et al.*, (2015), o Hidrograma Unitário (HU) corresponde ao escoamento gerado por uma precipitação efetiva unitária de intensidade constante igualmente distribuída por toda área de drenagem. Este modelo é utilizado para estimar vazões de cheia para quaisquer chuvas efetivas.

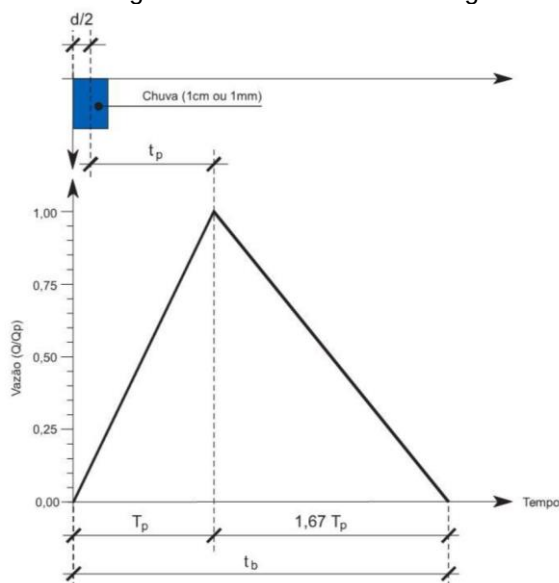
Este modelo de transformação de chuva-vazão segue algumas hipóteses (CHOW *et al.*, 1988):

- A intensidade da precipitação efetiva é constante durante toda a duração do evento;
- A distribuição espacial do evento é uniforme por toda a bacia hidrográfica;
- O intervalo de tempo do escoamento superficial é constante;
- Ao comparar dois hidrogramas de mesma duração, a intensidade do escoamento em cada momento será diretamente proporcional ao volume total escoado;
- O HU corresponde as características da bacia.

O HU proposto pelo SCS (SCS, 1972) baseado no HU desenvolvido por Victor Mockus (MOCKUS, 1957) é um dos modelos mais utilizados na literatura. Na

Figura 6 é apresentado um HU Sintético triangular da SCS, no qual um evento de chuva efetiva unitária ocorreu em uma determinada bacia (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

Figura 6 - Forma do Hidrograma unitário sintético triangular do SCS.



Fonte: Collischonn, W.; Dornelles, 2013.

Sendo:

- d a duração da precipitação unitária;
- T_p o tempo de ascensão do hidrograma, ou seja, o intervalo de tempo entre o início da precipitação e o pico do hidrograma;
- t_p o tempo de pico (*lagtime*), que corresponde a aproximadamente 60% do tempo de concentração;
- t_b o tempo de base, que é o tempo desde o início do evento chuvoso até o final do escoamento.

O tempo de concentração (t_c), na hidrologia, é o intervalo de tempo necessário para que a água precipitada no ponto mais distante da bacia escoe até o exutório. Ou seja, é o tempo necessário para que toda a área de drenagem contribua para o escoamento superficial (TUCCI, 2008).

Há diversas formulações de t_c na literatura, cada uma adequada para as suas condições, como o tipo de bacia (urbana ou rural), área (de poucos km^2 a milhares de km^2). O estudo realizado por Silveira (2005) avaliou e testou o erro de 23 formulações de tempo de concentração, compilando diversas informações sobre sua aplicabilidade e limitações teóricas. Silveira (2005) concluiu que as expressões citadas na

Tabela 4 apresentaram os menores erros percentuais.

Tabela 4 - Características e validade das expressões com menor erro avaliadas por Silveira (2005).

Fórmula	Tipo	Características da bacia-base			Recomendação Almeida (2005)	Referência
		Área (km ²)	S (%)	L (km)	Área	
Onda Cinemática	Rural	-	-	<0,03	<12000 km ²	Porto (1995) e Kibler (1982)
Kirpich	Rural	<0,45	0,3	<1,2	<12000 km ²	Porto (1995) e Kibler (1982)
V. Chow	Rural	1,1/19	-	-	<12000 km ²	DAEE (1978) e MOPU (1987)
Corps E.	Rural	<12000	<14	<257	<12000 km ²	Linsley (1967) e MOPU (1987)
Schaake	Urbana	<0,7	<7	<1,8	<62 ha	Schaake et al (1967)
Carter	Urbana	<21	<0,5	<12	<1070 ha	McCuen et al (1984)
Desbordes	Urbana	<51	<7	<1,8	<5100 ha	Desbordes (1974)

Fonte: Adaptado de Silveira (2005).

O tempo de pico (*lagtime*) pode ser estimado por meio da Equação 9, considerando que ele representa 60% do tempo de concentração:

$$t_{lag} = 0,60 * t_c \quad (9)$$

Em que:

- t_c é o tempo de concentração.

O tempo de ascensão do hidrograma pode ser calculado por meio da Equação 10:

$$T_p = \frac{\Delta t}{2} + t_{lag} \quad (10)$$

Sendo Δt a duração da precipitação efetiva, em minutos.

Logo, a vazão de pico do HU pode ser calculada por meio da Equação 11:

$$U_p = 2,08 * \frac{A}{T_p} \quad (11)$$

No qual:

- U_p é a vazão de pico, em m³/s;
- A é a área de drenagem, em km², e;
- T_p é o tempo de ascensão, em horas.

3.2.4 Propagação de Vazão em Canais Naturais

Conforme Collischonn e Dornelles (2013), o principal objetivo dos cálculos de propagação de cheias em rios e canais é a determinação do hidrograma de vazões para uma seção transversal, com base no hidrograma conhecido em uma ou mais seções a montante. Dessa forma, é possível entender o comportamento da onda de cheia ao longo do curso d'água.

Há dois grupos de metodologias para a estimativa de propagação de vazões de cheia, os métodos hidráulicos e os hidrológicos (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013). Sendo eles:

- **Métodos Hidráulicos:** São baseados em nas equações diferenciais de conservação de massa e quantidade de movimento de Saint-Venant;
- **Métodos Hidrológicos:** São métodos simplificados baseados na equação da continuidade junto com uma função simplificada que associa a vazão e o armazenamento d'água em um trecho de rio.

Estes métodos possuem diversas aplicações, dentre elas, sistemas de previsão e alerta de cheias.

Para este estudo, será utilizado o método hidrológico Muskingum-Cunge (CUNGE, 1969), que é uma modificação da metodologia de Muskingum (MCCARTHY, 1939), representada na Equação 12:

$$O_t = C_1 I_{t-1} + C_2 I_t + C_3 O_{t-1} + C_4 (q_L \Delta x) \quad (12)$$

Em que:

- C_1 , C_2 , C_3 e C_4 , são coeficientes representados pelas Equações 13, 14, 15, 16;
- I_{t-1} e I_t , as ordenadas dos hidrogramas nos tempos $t-1$ e t ;
- O_{t-1} , as ordenadas do hidrograma no ponto de saída no tempo $t-1$;
- Q_L , a contribuição lateral;
- Δx , comprimento do trecho do canal.

$$C_1 = \frac{\frac{\Delta t}{K} + 2X}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1 - X)} \quad (13)$$

$$C_2 = \frac{\frac{\Delta t}{K} - 2X}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1 - X)} \quad (14)$$

$$C_3 = \frac{2(x - 1) - \frac{\Delta t}{K}}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1 - X)} \quad (15)$$

$$C_4 = \frac{2 \frac{\Delta t}{K}}{\frac{\Delta t}{K} + 2(1 - X)} \quad (16)$$

Em que:

- K, o deslocamento da onda de cheia no curso d'água, em segundos;
- X, o fator de ponderação ($0 \leq X \leq 0,5$);
- Δt , o passo de tempo.

Os parâmetros K e X são o grande problema do método de Muskingum, sendo necessário dados observados de vazão nos pontos inicial e final do trecho (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013). Em contrapartida, o método de Muskingum-Cunge supera esta limitação ao utilizar características físicas do canal para estimar os valores de X e K, conforme as Equações 17 e 18:

$$K = \frac{\Delta x}{c} \quad (17)$$

Em que:

- Δx é o comprimento do trecho do canal, em m;
- C é a celeridade da onda de cheia, em m/s.

$$X = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{Q}{B * c * S_0 * \Delta x} \right) \quad (18)$$

Em que:

- B é a largura do rio, em m;
- S_0 a declividade do rio, em m/m;

- Q é a vazão de referência, em m^3/s ;
- Δx é o comprimento do trecho do canal analisado, m.

3.3 MODELOS HIDROLÓGICOS

Este capítulo apresenta os modelos hidrológicos utilizados neste estudo.

3.3.1 HEC-HMS

O HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System) é um *software* gratuito desenvolvido United States Army Corps of Engineers (USACE), com um amplo catálogo de modelos para simular o processo de precipitação-vazão. Este estudo utiliza a versão 4.10 do programa.

Conforme o Manual do Usuário do HEC-HMS (USACE, 2022), é possível representar os seguintes elementos hidrológicos (Tabela 5).

Tabela 5 - Componentes hidrológicos simulados no modelo HEC-HMS.

Elemento Hidrológico	Descrição
<i>Subbasin-Sub-bacia</i> 	Representa a bacia hidrográfica ou sub-bacias, neste elemento é calculado a precipitação efetiva e o escoamento superficial. A precipitação é o principal dado de entrada.
<i>Reach-Trecho</i> 	Representa os cursos d'água, sua função é transferir as vazões dos elementos a montante. A saída deste elemento é calculada por meio da atenuação e translação, caso necessário, as perdas podem ser incluídas neste cálculo.
<i>Juction-Junção</i> 	É o ponto de união entre dois ou mais elementos à montante. A saída é o somatório das vazões.
<i>Source-Fonte</i> 	Elemento que introduz vazão na bacia. Este ponto não possui fluxo de entrada, apenas dados de saída fornecido pelo usuário.
<i>Reservoir-Reservatório</i> 	Elemento que armazena água e/ou atenua cheias.

Diversion-Derivação



Elemento que divide o fluxo vindo de trechos a montante.

Sink-Sumidouro



Elemento que representa o exutório da bacia. Sumidouros não possuem fluxos de saída, apenas vazão de entrada vinda de elementos a montante.

Fonte: Adaptado de Chaves (2023) e USACE (2022).

Neste estudo, foram utilizados os elementos sub-bacia, trecho, junção e sumidouro. Nas sub-bacias são aplicados os processos hidrológicos de perdas e transformação, já nos trechos, aplica-se os métodos de propagação de vazões.

Na Tabela 6 são apresentados os processos hidrológicos que podem ser calculados nos elementos:

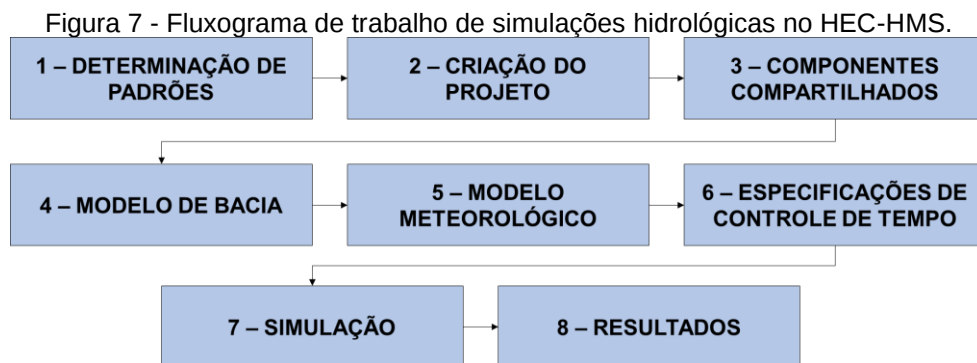
Tabela 6 - Processos hidrológicos simulados em cada elemento do modelo HEC-HMS.

Elemento Hidrológico	Processo Hidrológico	Modelo
Subbasin-Sub-bacia 	Canopy – Representa a interceptação de precipitação devido a presença das plantas	<i>Simple (e gridded)</i> <i>Dynamic</i>
	Surface – Representa a interceptação superficial d'água, a retenção ocorre devido a irregularidades da superfície	<i>Simple (e gridded)</i>
	Loss – Representa as perdas	<i>Deficit and constant (e gridded)</i> <i>Exponential Green and Ampt (e gridded)</i> <i>Initial and constant SCS curve number (e gridded)</i> <i>Smith Parlange Soil moisture accounting (e gridded)</i>
	Transform – Representa os métodos de transformação Chuva-Vazão	<i>Clark unit hydrograph</i> <i>Kinematic wave ModClark</i> <i>SCS unit hydrograph</i> <i>Snyder unit hydrograph</i> <i>User-specified s-graph</i> <i>User-specified unit hydrograph</i>
	Baseflow – Representa o escoamento de base	<i>Bounded recession</i> <i>Constant monthly</i> <i>Linear reservoir</i>

Trecho	Routing – Representa os métodos de propagação de vazão	<i>Nonlinear Boussinesq</i> <i>Recession</i> <i>Kinematic wave</i> <i>Lag Modified Puls</i> <i>Muskingum</i> <i>Muskingum-Cunge</i> <i>Straddle stagger</i> <i>Constant</i> <i>Percolation</i>
	Gain/Loss – Representa os ganhos e perdas dos canais, por meio de suas interações com o subsolo	

Fonte: Adaptado de Chaves (2023) e USACE (2022).

O fluxograma de trabalho adaptado do Manual do Usuário (USACE, 2022), é apresentado na Figura 7.



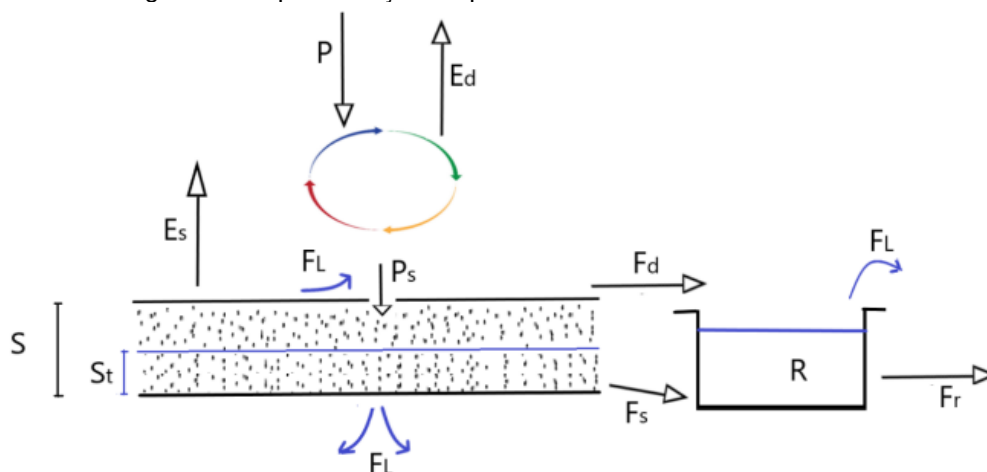
Fonte: Adaptado de Chaves (2023) e USACE (2022).

3.3.2 CAMPUS AGRESTE WATERSHED MODEL - CAWM

O *Campus Agreste Watershed Model* (CAWM) é um modelo hidrológico concentrado desenvolvido por Cirilo *et al.* (2020) e Cirilo (2021). Inicialmente, o objetivo do CAWM era simular o escoamento superficial em bacias de regiões semiáridas (Modelo CAWM IV). Contudo, o modelo CAWM V incorporou a vazão de base nos períodos de estiagem nas simulações, expandindo a aplicabilidade para regiões úmidas.

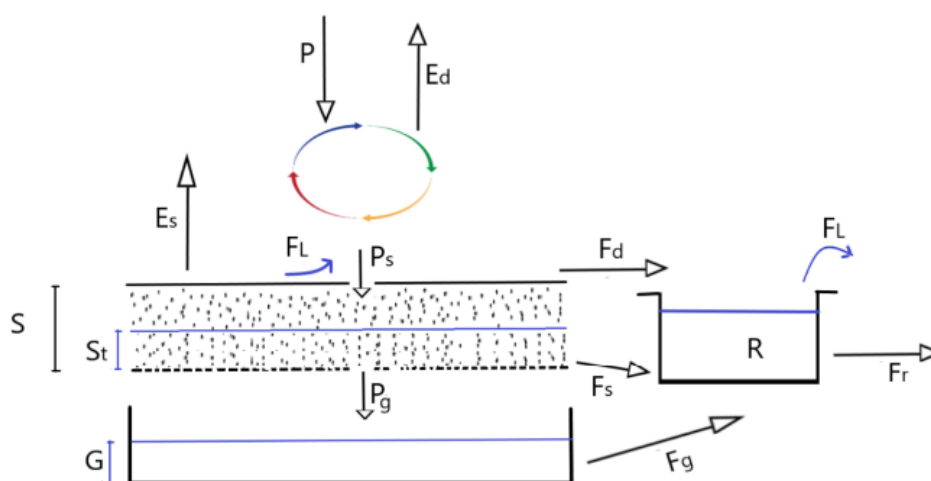
O modelo CAWM representa os fluxos por meio de reservatórios, sendo eles: solo (S), calha fluvial (R) e subterrâneo (G) (apenas no modelo CAWM V) (CIRILO, 2021). Os processos físicos simulados em ambas as versões do programa são ilustrados na Figura 8 e na Figura 9, respectivamente.

Figura 8 - Representação esquemática do modelo CAWM IV.



Fonte: Cirilo (2021).

Figura 9 - Representação esquemática do modelo CAWM V.



Fonte: Cirilo (2021).

Os fluxos e processos simulados nas rotinas de cálculo estão dispostas a seguir (CIRILO, 2021):

- 1) Inicialmente, o modelo realiza o balanço precipitação-evapotranspiração potencial (E).
 - a) Quando há precipitação suficiente, a evapotranspiração é subtraída de imediato (Equação 19), gerando assim a precipitação efetiva (P_n);
 - b) Caso contrário, toda precipitação será evaporada (Evaporação direta, E_d) e a parcela restante, quando possível, será evaporada do reservatório do solo (E_n) (Equação 20).

$$\text{Se } P \geq E, P_n = P - E \quad (19)$$

$$\text{Se } P \leq E, E_d = P \text{ e } E_n = E - E_d \quad (20)$$

- 2) Em seguida, a precipitação efetiva seguirá 3 caminhos:
- a) Recarga do solo (P_s), parcela que recarrega o reservatório do solo;
 - b) Evapotranspiração suplementar (E_s), parcela que evapora para suprir o restante da evapotranspiração potencial, quando possível;
 - c) Escoamento superficial (F_d), parcela que representa o escoamento, quando positiva (Equação 21).

$$F_d = P_n - P_s - E_s \quad (21)$$

- 3) O modelo considera o fluxo subsuperficial (F_s), que representa a percolação do reservatório do solo (S) para a calha fluvial (R);
- 4) O volume d'água retido na calha fluvial é incrementado pelos fluxos do escoamento superficial e subsuperficial. Sendo F_r o escoamento fluvial;
- 5) As perdas do sistema (F_L) são subtraídas do escoamento superficial direto (F_d);
- 6) O reservatório subterrâneo (G) é alimentado quando o solo atinge o ponto de saturação, ocorrendo o fluxo de percolação profunda (P_g);
- 7) O reservatório subterrâneo contribui para a vazão do rio (F_g).

Os parâmetros de entrada do CAWM são divididos em duas categorias, sendo eles hidrológicos e físicos:

- **Variáveis hidrológicas:** são as séries históricas de precipitação média e vazão. Além dos valores estimados de evapotranspiração potencial.
- **Parâmetros físicos:** são obtidos via geoprocessamento, sendo:
 - i) Área da bacia, A_b ;
 - ii) Comprimento total da rede de drenagem, L_t ;
 - iii) Inclinação do canal principal, I ;
 - iv) Capacidade máxima de armazenamento d'água, S ;
 - v) Tempo de concentração, T_c .

3.3.3 Nonstationary Conceptual Rainfall Runoff Toolbox - NCRRT

O *Nonstationary Conceptual Rainfall Runoff Toolbox* (NCRRT) é uma ferramenta desenvolvida por Sadegh *et al.*, (2019), que realiza modelagem de processos precipitação-vazão não estacionários, ou seja, com parâmetros variáveis no tempo. O NCRRT está disponível gratuitamente no ambiente MATLAB.

O NCRRT possui os seguintes modelos conceituais:

- *Génie Rural à 4 Paramètres Journalier* (GR4J) (Perrin *et al.*, 2003);
- *Génie Rural à 5 Paramètres Journalier* (GR5J) (Le Moine, 2008);
- *Génie Rural à 6 Paramètres Journalier* (GR6J) (Pushpalatha *et al.*, 2011);
- *Hybrid Model* (HyMod) (Boyle *et al.*, 2000; Gharari *et al.*, 2013);
- *Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning* (HBV) (Aghakouchak e Habib, 2010).

A interface do programa é bastante simples (Figura 10). No espaço *Calibration Step* (Etapa de Calibração), o usuário deve escolher o modelo hidrológico, o intervalo de calibração, a área da bacia e um arquivo texto (.txt) com os dados de entrada organizados em colunas. Sendo:

- Ano;
- Mês;
- Dia;
- Precipitação, em mm/dia;
- Evapotranspiração, em mm/dia;
- Vazão; em m³/s.

Figura 10 - Interface do NCRRT.

The screenshot shows the NCRRT software interface. The 'Calibration Step' section includes a 'Choose Model' dropdown, 'Basin Area' (km²), 'Select Data' button, 'Read MOPEX Data' button, 'Calibration Period' (mm/dd/yyyy to mm/dd/yyyy), and a 'Run Local Optimization' button. The 'Analysis Step' section includes a table for parameter names and values, checkboxes for 'Time-Varying', 'Simulation Period' (mm/dd/yyyy to mm/dd/yyyy), 'Non-Stationarity Period' (mm/dd/yyyy to mm/dd/yyyy), 'Time-Varying Par Start Value', and 'Time-Varying Par Final Value'. A 'Run Simulation' button is located below the analysis parameters. At the bottom, there is a plot area with axes from 0 to 1, and three output fields: 'NSE (-)', 'RMSE (m³/s)', and 'PBIAS (%)'.

Fonte: Sadegh *et al.*, 2019.

Dado o modelo hidrológico e os dados de entrada, o NCRRT calibra os parâmetros necessários (Tabela 7).

Tabela 7 – Descrição dos parâmetros dos modelos conceituais do NCRRT.

Modelo	Parâmetro	Descrição	Unidade	Faixa
GR4J	S1max	Capacidade máxima do reservatório de produção	mm	[0; 1500]
	Exch	Coefficiente de troca de água subterrânea	mm	[-10; 10]
	S2max	Capacidade máxima de um dia do reservatório de roteamento	mm	[1; 500]
	UHB	Tempo base da unidade hidrógrafo UH1	Dias	[0,5; 8]
GR5J	Exchr	Limite de troca de água subterrânea (para memória de longo prazo)	-	[-4; 4]
GR6J	S3max	Capacidade máxima do reservatório de roteamento adicional (paralelo a S2max)	mm	[0,5; 20]
	Cmax	Reservatório máximo de umidade do solo	mm	[1; 500]
HyMod	Bexp	Variabilidade espacial do armazenamento de umidade do solo	-	[0,1; 2]
	Alpha	Fator de distribuição entre reservatórios de roteamento rápido e lento	-	[0,1; 0,99]

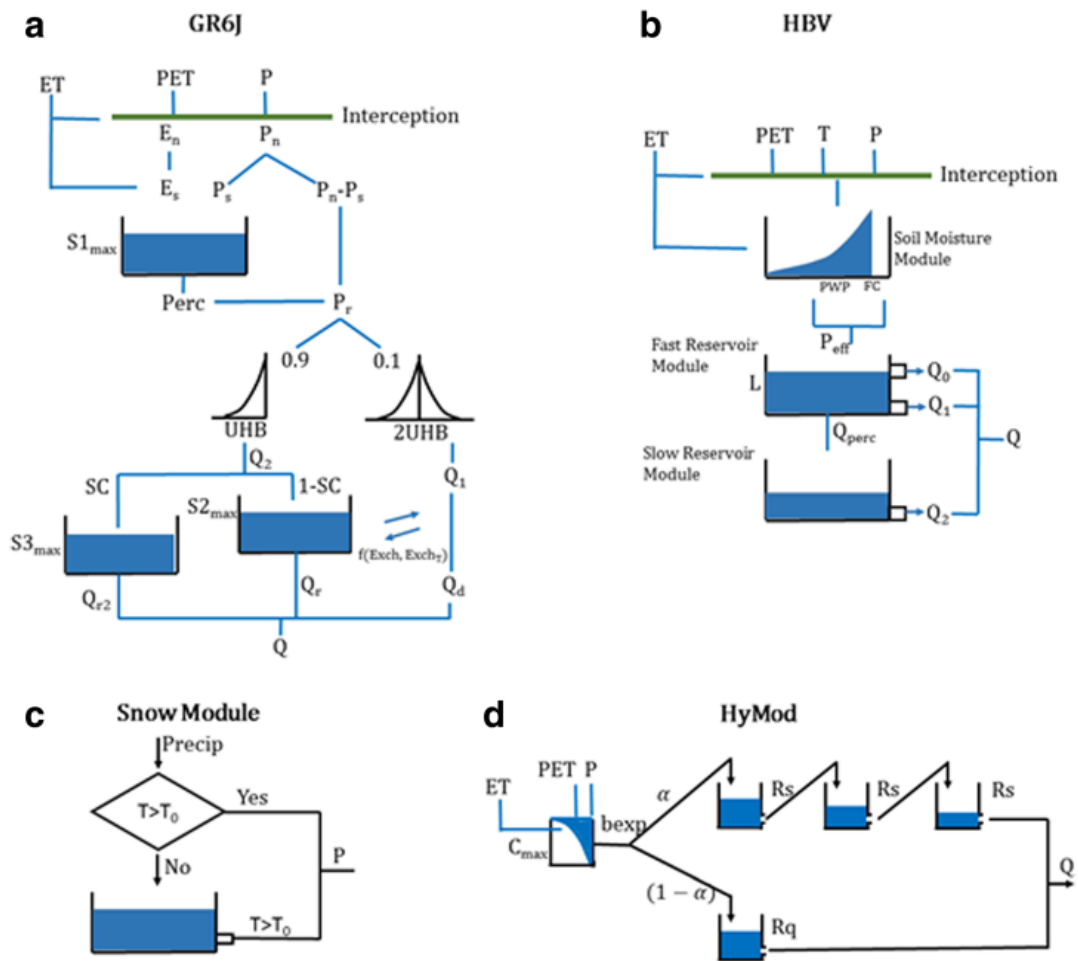
HBV	Rs	Tempo de residência do reservatório de fluxo lento	Dias	[0,001; 0,1]
	Rq	Tempo de residência dos reservatórios de fluxo rápido	Dias	[0,1; 0,99]
	PWP	Ponto de murcha permanente do solo	mm	[90; 180]
	FC	Capacidade de campo (umidade do solo)	mm	[100; 200]
	Beta	Coeficiente de forma	-	[1,7]
	L	Nível de água limite (fluxo superficial)	mm	[2; 5]
	K0	Coeficiente de armazenamento de fluxo próximo à superfície	1/dia	[0,05; 0,2]
	K1	Coeficiente de armazenamento de fluxo intermediário	1/dia	[0,01; 0,1]
	K2	Coeficiente de armazenamento de fluxo base	1/dia	[0,01; 0,05]
	Kperc	Coeficiente de armazenamento de percolação	1/dia	[0,01; 0,05]
Modulo Neve	C	Coeficiente de ajuste da evapotranspiração potencial	1/°C	[0,01; 0,07]
	DD	Fator graus Celcius-dia	mm/°C	[0,01; 7]

Fonte: Adaptada de Sadegh *et al.*, 2019.

Ao finalizar a calibração do modelo, o NCRRT fornece os parâmetros estatísticos da simulação (NSE, PBIAS e RMSE). Caso necessário, o usuário pode alterar os parâmetros calibrados para corresponder com os dados físicos da bacia.

Na Figura 10 foram ilustradas as estruturas esquemáticas dos modelos. Na Figura 11a foram apresentados esquematicamente os modelos GR4J, GR5J e GR6J. Enquanto, na Figura 11b foi apresentado o HBV e na Figura 11c o módulo de neve. Já na Figura 11d está ilustrado o modelo HyMod.

Figura 11 - Estruturas esquemáticas dos modelos do NCRRT.



Fonte: Adaptada de Sadegh *et al.*, 2019.

Como pode ser observado na Figura 11a, o modelo GR6J pode ser simplificado para GR5J quando removido o reservatório S3max. Além disso, com a omissão do parâmetro Exchr, o GR5J pode ser simplificado para o GR4J.

3.4 MÉTRICAS ESTATÍSTICAS

As etapas de Calibração e Validação do modelo são fundamentais para garantir a obtenção de resultados estatisticamente significantes. Nessas etapas são realizadas comparações das séries de dados sintéticos com dados medidos em campo. Para modelos hidrológicos, as medições realizadas em uma estação fluviométrica são comparadas com os dados resultantes da simulação para o mesmo ponto (CHAVES; 2023).

Na etapa de calibração são realizados os ajustes dos parâmetros do modelo, com o objetivo de obter resultados de simulação próximos à realidade, ou seja, com bom ajuste estatístico (FRAGOSO JR *et al.*, 2009). Um dado intervalo de tempo, ou evento hidrológico, será utilizado para calibrar o modelo. Ao passo que a validação é realizada, comparação dos resultados obtidos com medições são feitas para diferentes períodos, propendendo até ser comparados com outros eventos, verificando assim que a modelagem hidrológica é capaz de realizar simulações consistentes e aceitáveis (ARNOLD *et al.*, 2012).

O Coeficiente de Eficiência Nash-Sutcliffe (NASH; SUTCLIFFE, 1970), ou NSE, é um dos critérios estatísticos mais utilizado para avaliar o ajuste de modelos hidrológicos (BRIGHENTI *et al.*, 2019). O NSE é expresso pela Equação 22:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2} \quad (22)$$

Em que:

- NSE: Coeficiente de Eficiência Nash-Sutcliffe, variando de $-\infty$ a 1;
- n: número de dados observados;
- O_m : média dos dados observados;
- O_i : dados observados;
- S_i valores simulados.

Outros indicadores complementam a avaliação estatística dos modelos, como o *Percent Bias* (Pbias) e o *Root Mean Standard Deviation Ratio* (RSR). Nas Equações 23 e 24 são representados, respectivamente, o Pbias e o RSR:

$$Pbias = 100 * \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (23)$$

Variando de $-\infty$ até $+\infty$, o Pbias mede a tendência média dos dados simulados serem maiores ou menores que as medições. O valor ótimo desse indicador é 0.

$$RSR = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2 \quad (24)$$

O RSR avalia o erro médio quadrático normalizado por meio do desvio padrão da amostra medida em campo, o valor ótimo é 0 e pode variar até o infinito.

Em seus estudos, Moriasi et al (2007) classificou os intervalos dos índices de desempenho estatísticos, conforme a Tabela 8.

Tabela 8 – Indicadores de performance recomendados para simulações.

Classificação	NSE	Pbias	RSR
Muito Bom	0,75 a 1,00	$< \pm 10$	0 a 0,5
Bom	0,65 a 0,75	± 10 a ± 15	0,5 a 0,6
Satisfatório	0,5 a 0,65	± 15 a ± 25	0,6 a 0,7
Insuficiente	$< 0,5$	$> \pm 25$	$> 0,7$

Fonte: Moriasi *et al.*, (2007).

4 METODOLOGIA

Este capítulo aborda todo o plano de trabalho para a elaboração deste estudo, por meio da especificação da área de estudo e os passos necessários para a execução das modelagens hidrológicas.

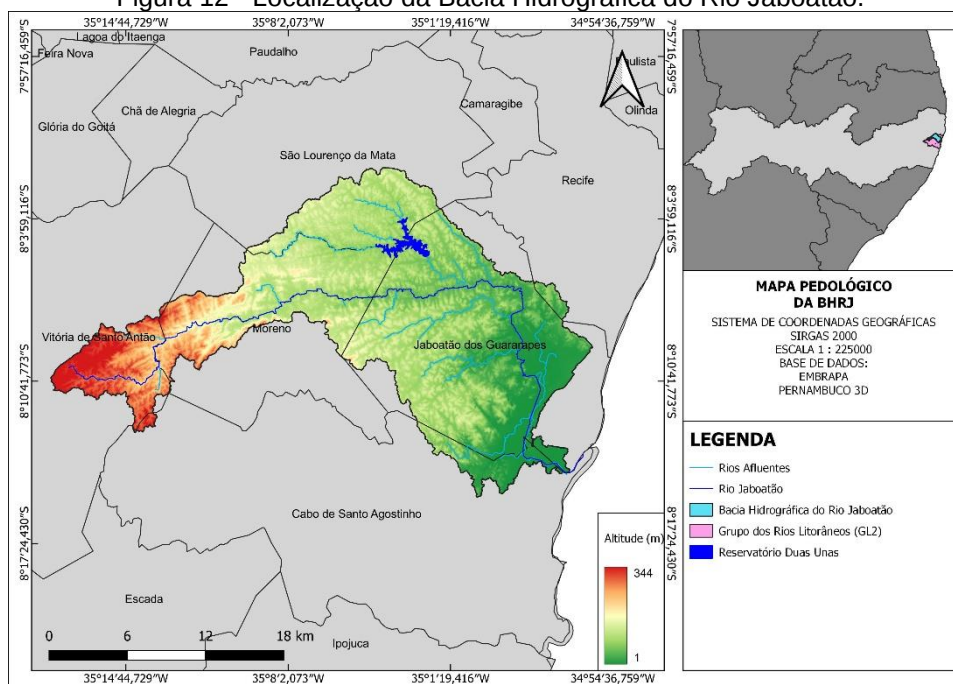
4.1 ÁREA DE ESTUDO

4.1.1 Bacia Hidrográfica do Rio Jaboatão

Localizada no estado de Pernambuco, a Bacia Hidrográfica do Rio Jaboatão (BHRJ) faz parte do Grupo dos Rios Litorâneos (GL2) (GALINDO, 2008), com coordenadas 8°00" e 8°14" Sul e 34°50" e 35°15" W (SILVA, 2013). A BHRJ está inserida em 2 mesorregiões do estado de Pernambuco, a Região Metropolitana do Recife (RMR) e a Zona da Mata Conforme (SILVA, 2018), o curso d'água principal percorre cerca de 75 km, drenando uma área territorial de 420 km².

Com nascente no município da Vitória de Santo Antão, o Rio Jaboatão escoar em direção ao Oceano Atlântico cruzando a zona urbana de Moreno e Jaboatão dos Guararapes, onde ocorre o encontro com o Rio Pirapama nas proximidades do seu exutório (Figura 12). Além do mais, a BHRJ engloba partes dos municípios de São Lourenço da Mata, Cabo de Santo Agostinho e Recife (SILVA, 2018).

Figura 12 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Jaboatão.



Fonte: Autor (2024).

Conforme descrito por Gomes (2005), a BHRJ possui formato variado ao longo do percurso do rio, sendo estreito a montante do município de Moreno e alargando-se na medida que se aproxima do oceano. Os principais afluentes do Rio Jaboatão são: Riacho Laranjeiras, Rio Carnijó, Rio Suassuna e o Rio Zumbi, na margem direita. Contribuindo pela margem esquerda há o Riacho Limeira, Rio Duas Unas e o Rio Mussaíba (MOREIRA, 2007).

Localizada no município de Jaboatão dos Guararapes, a barragem Duas Unas foi construída em 1982 às margens do rio Duas Unas, destacando-se como o quarto maior reservatório na região metropolitana do Recife, com capacidade para 15.709.033 m³ (APAC, 2020). Essa infraestrutura é crucial para o abastecimento local, contribuindo com uma vazão de 1000 l/s. O maciço construído com concreto, composto por uma tomada d'água e um vertedouro de 80 metros de extensão, reforça a robustez da barragem.

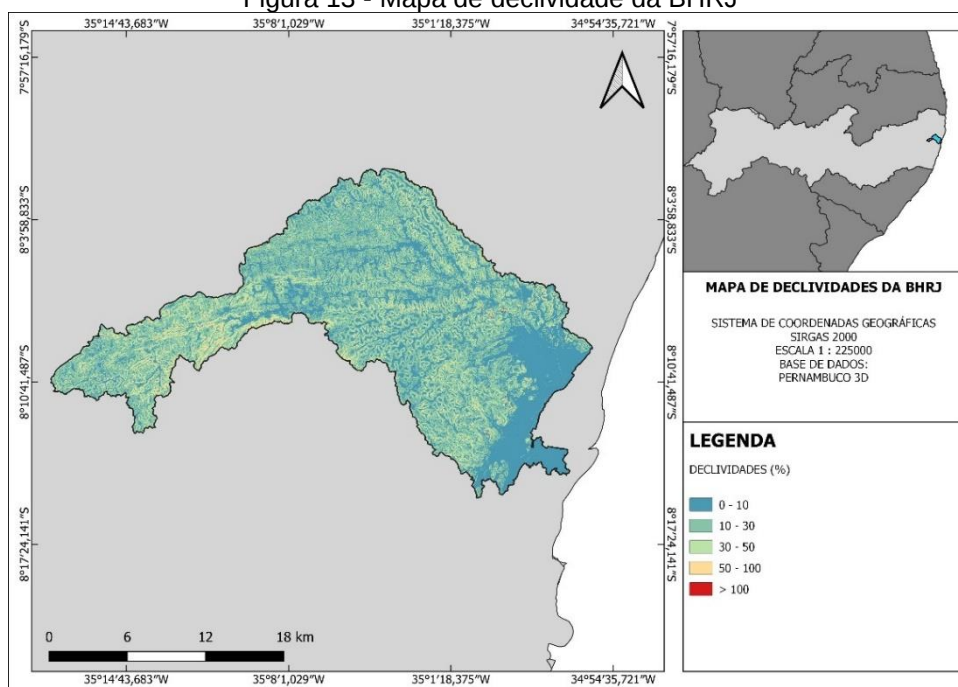
O canal principal da BHRJ flui de forma contínua em direção ao Oceano Atlântico, sendo seu escoamento classificado como exorreico (CHRISTOFOLETTI (1980, p. 102)). Com padrão de drenagem dendrítico, que se assemelha a distribuição de galhos de uma árvore, sendo o canal principal o tronco e os afluentes os seus galhos.

Conforme os estudos de Silva (2018), as características geomorfológicas da BHRJ de forma geral não favorecem a ocorrência de enchentes e inundações,

contudo as modificações realizadas por atividades antropológicas contribuem para a ocorrência de picos de enchentes e inundações em alguns trechos do rio. Sendo elas: ocupação das margens dos rios, retificação dos canais, alterações do uso e ocupação do terreno, concentração de fluxos etc. Logo, essa problemática é potencializada devido aos altos índices de precipitação na região.

O relevo varia ao longo do percurso do Rio Jaboatão, as áreas de alto e médio curso possuem declividade acentuada, com valores médios de 20 a 75%. Conforme a classificação da EMBRAPA (2016), essas zonas são classificadas como ondulado a forte ondulado. Contudo, os trechos do baixo curso apresentam relevo de planície, com declividade variando entre 0 e 8% (Figura 13). Conforme Cunha (2007), a velocidade de escoamento está proporcionalmente relacionada com a declividade do trecho, logo as áreas de alto e médio curso possuem rápido escoamento e movimentação de massa, enquanto as zonas de baixo curso o escoamento é mais lento e mais susceptível a sedimentação e inundações (SILVA, 2018).

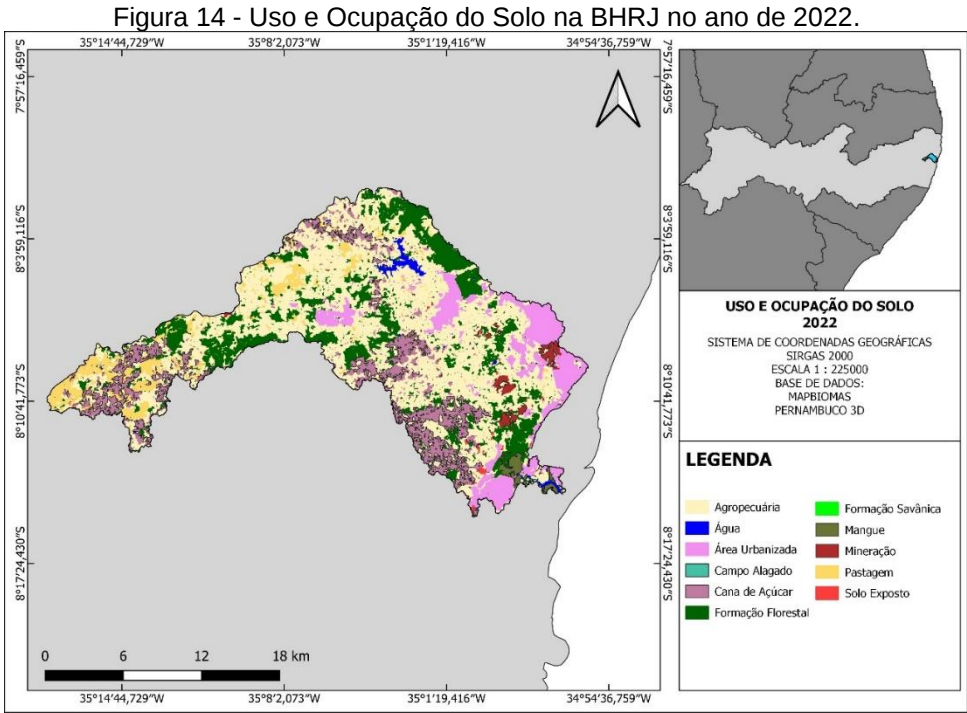
Figura 13 - Mapa de declividade da BHRJ



Fonte: O Autor (2024).

O uso e ocupação do solo é variável ao longo da BHRJ, nas zonas do alto e médio curso há predominância de monocultura de cana-de-açúcar, pastagens e formações florestais, Figura 14. Na Tabela 9 é apresentado o quadro das áreas classificadas por cobertura do solo.

As áreas de concentrações urbanas estão localizadas nas zonas de médio e baixo curso, sendo Moreno localizada a primeira grande concentração urbana cruzada pelo Rio Jaboatão. É evidente a ocupação de áreas de riscos, como morros, encostas e zonas inundáveis, em especial no município de Moreno e Jaboatão dos Guararapes.



Fonte: O Autor (2024).

Tabela 9 - Quantitativo do Uso e Ocupação do solo na BHRJ.

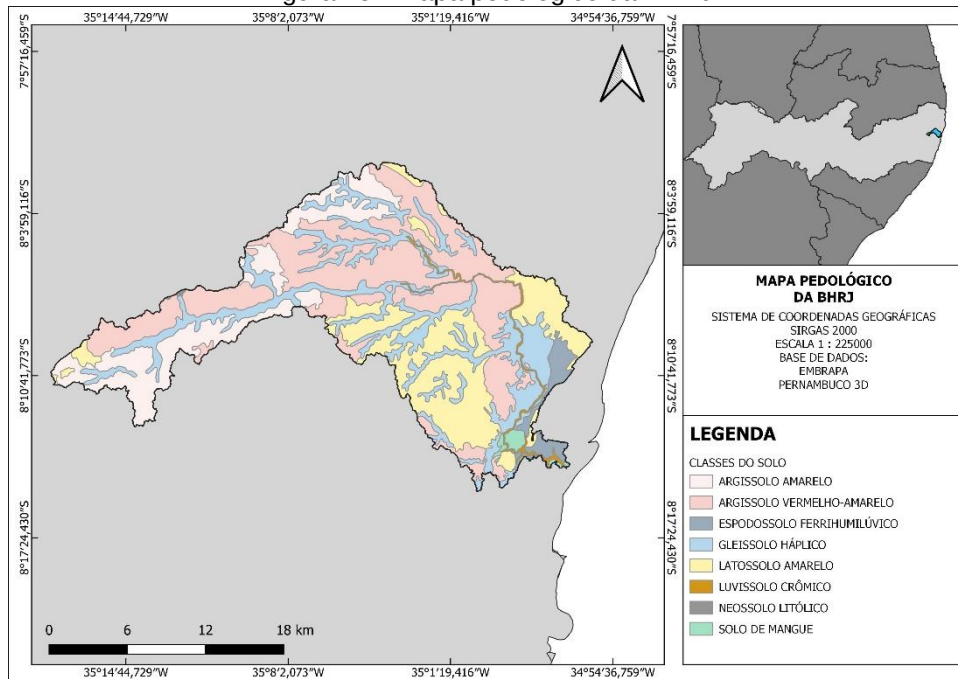
USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA BHRJ		
OCUPAÇÃO	ÁREA (km²)	PORCENTAGEM (%)
Agropecuária	156,53	38,85
Água	3,58	0,89
Área Urbanizada	42,91	10,65
Campo Alagado	0,40	0,10
Cana de Açúcar	70,38	17,47
Formação Florestal	82,46	20,47
Formação Savânica	0,16	0,04
Mangue	3,51	0,87
Mineração	6,17	1,53
Pastagem	34,67	8,60
Solo Exposto	2,13	0,53

Fonte: O Autor (2024).

Com base no Mapa de Pedologia Consolidado disponibilizado pela ANA (2017), foram identificadas 8 classes de solo na BHRJ, Figura 15. Sendo: Argissolo Amarelo,

Argissolo Vermelho-Amarelo, Espodossolo Ferrihumilúvico, Gleissolo Háplico, Latossolo Amarelo, Luvissoilo Crômico, Neossolo Litólico e Solo de Mangue.

Figura 15 - Mapa pedológico da BHRJ.



Fonte: O Autor (2024).

De forma geral, nas regiões de alto e médio curso há predominância de Argissolo Vermelho-Amarelo e Argissolo Amarelo, enquanto no baixo curso há uma maior variedade de classes identificadas. Nas zonas de corpos hídricos há presença de Gleissolo Háplico e Luvissoilo Crômico.

Na Tabela 10 é apresentado o quantitativo de áreas das classes do solo presentes na BHRJ.

Tabela 10 - Classes dos solos presentes na BHRJ.

CLASSE DO SOLO	ÁREA (km ²)	PORCENTAGEM (%)
ARGISSOLO AMARELO	62,98	15,38
ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO	146,17	35,69
ESPODOSSOLO FERRIHUMILÚVICO	11,19	2,73
GLEISSOLO HÁPLICO	91,39	22,32
LATOSSOLO AMARELO	88,56	21,63
LUVISSOLO CRÔMICO	5,71	1,40
NEOSSOLO LITÓLICO	0,28	0,07
SOLO DE MANGUE	3,22	0,79

Fonte: O Autor (2024).

Localizada na porção leste do Estado de Pernambuco, o clima da BHRJ sofre influência de massas de ar quentes e úmidas oriundas do oceano atlântico, sendo a massa Tropical Atlântica a mais atuante na região, (SILVA, 2018). De acordo com Silva (2013), o clima local é do tipo As' (quente e úmido) segundo a classificação Köppen, com precipitação média anual acima de 1.500 mm. A temperatura média é de 26 °C, com variação de 18 °C a 32 °C.

As áreas mais próximas do oceano possuem valores maiores de precipitação, como na Região Metropolitana do Recife que possui acumulado anual superior a 2.000 mm (GIRÃO, *et al.*, 2006), há uma redução na precipitação na medida que avança dentro do continente. A quadra chuvosa é concentrada nos meses de outono-inverno, entre abril e julho, com acumulados mensais oscilando 140mm e 270 mm (SILVA, 2013).

De acordo com dados do Censo Demográfico 2022 (IBGE, 2022), a BHRJ engloba a Região Metropolitana do Recife, a zona mais populosa e de maior relevância na economia do estado, conforme dados da Tabela 11.

Tabela 11 – Dados demográficos dos municípios situados na BHRJ.

MUNICÍPIOS	ÁREA (km ²)	DENSIDADE (hab/km ²)	POPULAÇÃO TOTAL	PIB per capita (2020)	ÁREA NA BHRJ (km ²)
Cabo de S. Agostinho	445,39	456,77	203.440	R\$ 48.296,36	8,93
Jaboatão dos Guararapes	258,72	2489,28	644.037	R\$ 18.809,45	215,91
Moreno	194,20	284,72	55.292	R\$ 11.992,97	93,25
Recife	218,84	6803,60	1.488.920	R\$ 30.427,69	5,06
São Lourenço da Mata	263,69	421,90	111.249	R\$ 11.520,84	55,18
Vitória de Santo Antão	336,57	398,38	134.084	R\$ 30.132,25	38,34

Fonte: IBGE, Censo Demográfico (2022).

A bacia hidrográfica em questão abrange principalmente o município de Jaboatão dos Guararapes, ocupando 51,40% de sua extensão. Na sequência, encontramos Moreno com 22,20%, São Lourenço da Mata com 13,13%, e Vitória de Santo Antão com 9,12%. As áreas restantes pertencem a Recife (1,22%) e ao Cabo de Santo Agostinho (2,15%), ambos com proporções menores. Essa distribuição territorial, conforme apontado por Silva (2018), destaca a predominância de Jaboatão

dos Guararapes na composição geográfica da bacia hidrográfica, influenciando diretamente a configuração demográfica dessa região pernambucana. Na Tabela 12 é estimado que há aproximadamente 640 mil habitantes na região.

Tabela 12 - População total da BHRJ.

MUNICÍPIOS	ÁREA NA BHRJ (km²)	DENSIDADE (hab/km²)	POPULAÇÃO NA BHRJ
Cabo de 'S. Agostinho	9,00	456,77	4.112
Jaboatão dos Guararapes	217,64	2489,28	541.756
Moreno	94,00	284,72	26.762
Recife	5,10	6803,60	34.701
São Lourenço da Mata	55,62	421,90	23.466
Vitória de Santo Antão	38,65	398,38	15.396
Total	420	1538,56	646.193

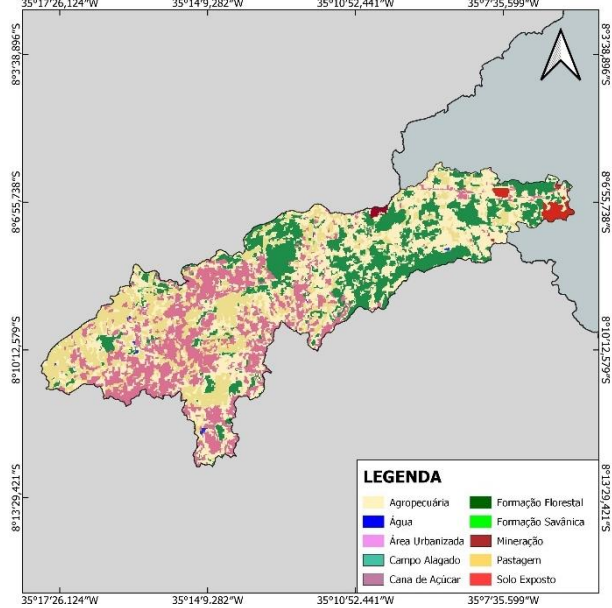
Fonte: Elaborada pelo Autor com base no Censo Demográfico IBGE (2022).

4.1.2 Sub-Bacia da Estação 39189560

A sub-bacia da estação 39189560 possui área de drenagem de 90,812 km² está localizada no alto curso do Rio Jaboatão, com relevo de declividade acentuada com valores médios de 20 a 75%, classificado como ondulado a forte ondulado de acordo com a classificação do EMBRAPA (Santos, 2018). O comprimento do canal principal de 36,71 km e declividade média de 0,009m/m.

A sub-bacia Moreno é predominantemente rural, com áreas de Agropecuária (35,26%), Formação Florestal (21,54%), Cana de Açúcar (21,30%), Pastagem (20,20%) e etc, as demais classes estão presentes na Tabela 13. A PCD está localizada nos trechos iniciais do rio na mancha urbana de Moreno, visto que apenas 1,13% de sua área é impermeabilizada. Na Figura 16 é apresentado o mapa de uso e ocupação do solo da sub-bacia Moreno para o ano de 2022.

Figura 16 - Uso e ocupação do solo na sub-bacia Moreno no ano de 2022.



Fonte: O Autor (2024).

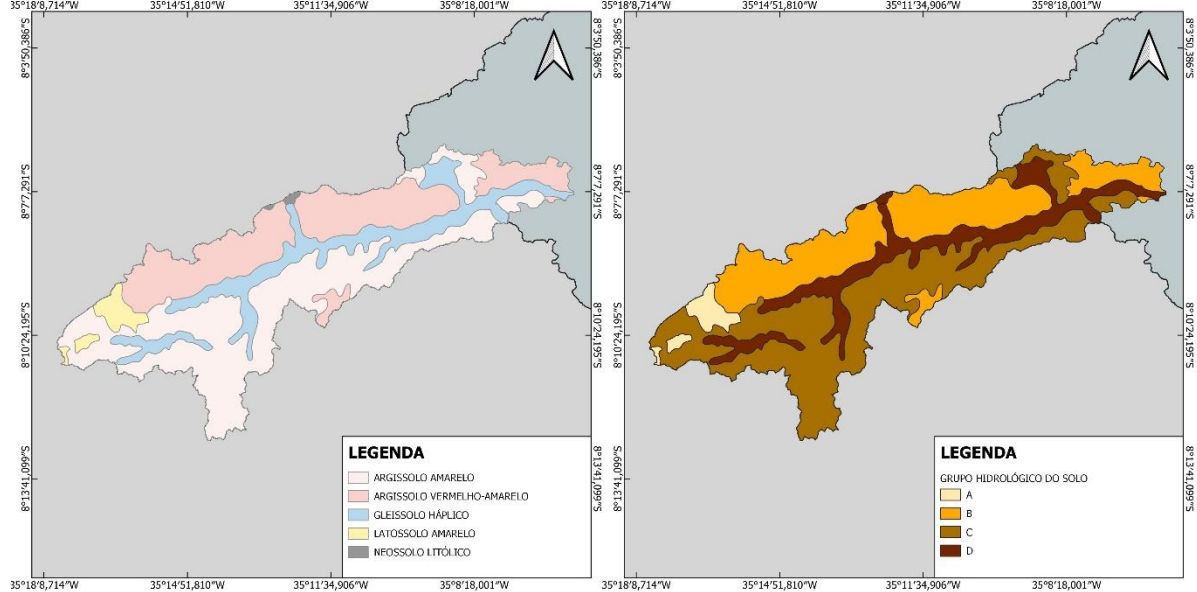
Tabela 13 - Quantitativo do Uso e Ocupação do solo na Sub-bacia Moreno.

USO E OCUPAÇÃO DO SOLO DA SUB-BACIA MORENO		
OCUPAÇÃO	ÁREA (km²)	PORCENTAGEM (%)
Agropecuária	32,02	35,26%
Água	0,13	0,15%
Área Urbanizada	1,03	1,13%
Campo Alagado	0,01	0,01%
Cana de Açúcar	19,34	21,30%
Formação Florestal	19,56	21,54%
Formação Savânica	0,12	0,13%
Mineração	0,22	0,24%
Pastagem	18,34	20,20%
Solo Exposto	0,03	0,03%

Fonte: O Autor (2024).

Conforme a Figura 17, há predominância de Argissolos amarelos e vermelho-amarelo, correspondendo a cerca de 43,86% e 33,56% da área, respectivamente. Além de concentrações de Gleissolos háplico (19,08%), Latossolo amarelo (3,19%) e Neossolo lítólico (0,31%), Tabela 14. De acordo com a classificação dos solos de Tucci (2005), há predominância do grupo de solos B (34,09%) e C (44,56%) que implica em capacidade média a alta de escoamento superficial e taxas médias a baixas de infiltração no solo. Há predominância do grupo D (19,69%) nas margens do Rio Jaboatão.

Figura 17 - Tipos e grupo hidrológico dos solos da sub-bacia Moreno.



Fonte: O Autor (2024).

Tabela 14 - Classes dos solos presentes na Sub-bacia Moreno.

CLASSE DO SOLO	ÁREA (km²)	PORCENTAGEM
ARGISSOLO AMARELO	39,83	43,86%
ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO	30,47	33,56%
GLEISSOLO HÁPTICO	17,32	19,08%
LATOSSOLO AMARELO	2,90	3,19%
NEOSSOLO LITÓLICO	0,28	0,31%

Fonte: O Autor (2024).

Tabela 15 - Áreas dos grupos hidrológicos da Sub-bacia Moreno.

GRUPO HIDROLÓGICO	ÁREA (km²)	PORCENTAGEM
A	2,89	3,24%
B	30,48	34,09%
C	39,84	44,56%
D	17,60	19,69%

Fonte: O Autor (2024).

4.2 COLETA E TRATAMENTO DE DADOS HIDROLÓGICOS

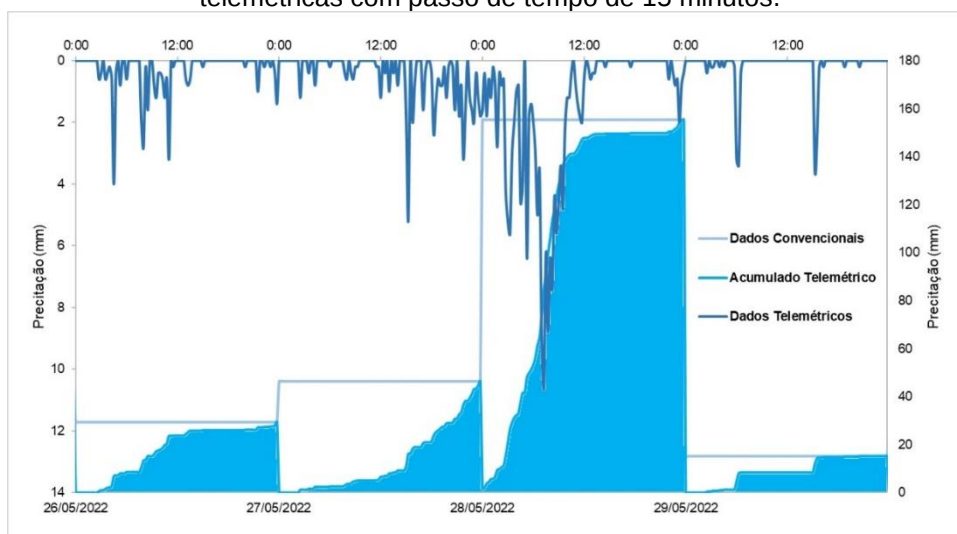
4.2.1 Coleta de dados

A coleta de dados hidrológicos é fundamental para compreender o clima e escoamento superficial da área de estudo. Neste trabalho foram utilizados como banco de dados para as estações: a ferramenta HIDROWEB do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) da ANA e o Mapa Interativo da Rede Observacional para Monitoramento de Risco de Desastres Naturais do CEMADEN (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais).

As estações são classificadas de acordo com o tipo de dado que é medido, sendo pluviométricas os postos de coleta de dados de precipitação e fluviométricas os pontos de medição de vazão dos rios.

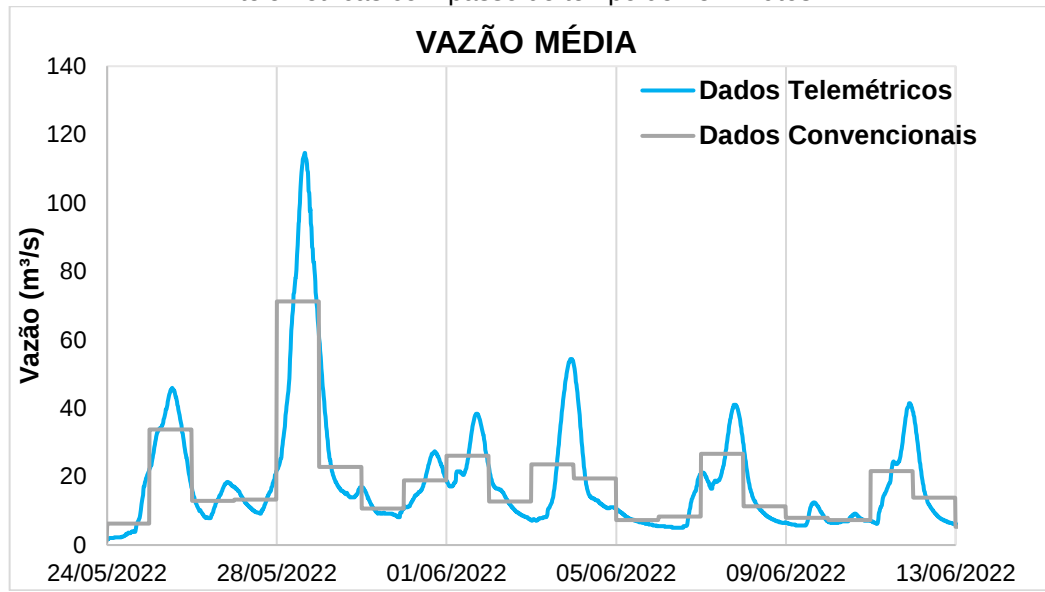
O intervalo selecionado depende do nível de detalhe do estudo, estações com dados sub diários são ideais para avaliar eventos específicos. Enquanto, estações diárias possuem desempenho melhor para avaliar longos períodos. Neste estudo, foram avaliadas ambos os tipos de amostragens de dados, Figura 18 e Figura 19. Para este estudo, foram adotados intervalos de tempo de 15 minutos para os eventos sub-diários e 24 horas para os diários.

Figura 18 - Comparação entre os dados medidos em estações pluviométricas convencionais e telemétricas com passo de tempo de 15 minutos.



Fonte: O Autor (2024).

Figura 19 - Comparação entre os dados medidos em estações fluviométricas convencionais e telemétricas com passo de tempo de 15 minutos.

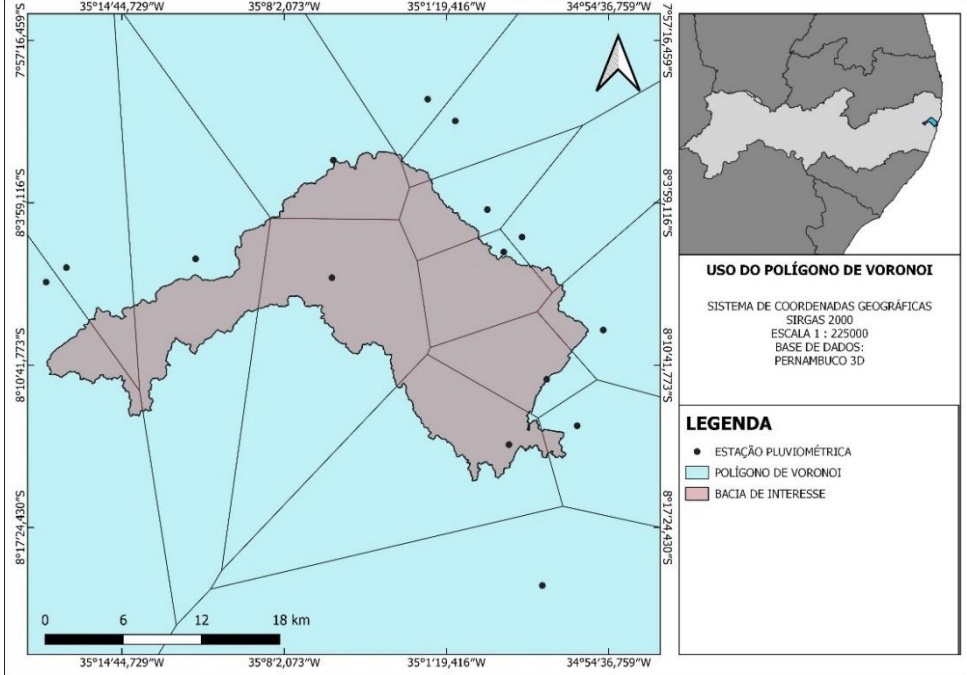


Fonte: Autor (2024).

Inicialmente, a área de estudo é delimitada e as estações dentro e nas proximidades desse polígono são selecionadas. É necessário realizar uma triagem inicial dos dados, descartando as amostras com ausência de dados no período de interesse ou com longos períodos de falhas.

Após descartar as estações sem dados no período determinado, o polígono de Voronoi, Figura 20, pode ser utilizado para delimitar a área de influência das estações próximas ao local de estudo, eliminando as estações que não possuem influência sobre a bacia de interesse.

Figura 20 - Aplicação dos polígonos de Voronoi para a estimativa das áreas de influência.



Fonte: O Autor (2024).

4.2.2 Dados Fluviométricos

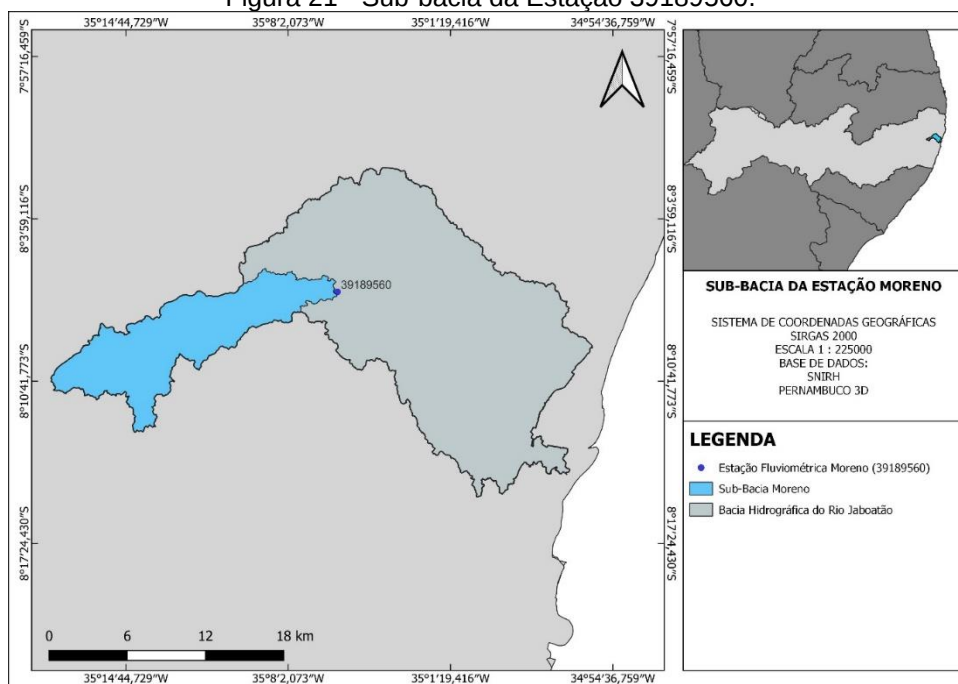
Com 90,812 km² de área de drenagem, a Estação Fluviométrica Moreno (39189560), localizada no município de Moreno-PE, é uma plataforma de coleta de dados (PCD) que realiza as medições de cota e vazão do Rio Jaboatão (Figura 21). Além disso, dados de precipitação também são coletados neste posto. Na Tabela 16 são apresentados os demais dados técnicos da estação.

Tabela 16 - Estação fluviométrica selecionada.

Posto fluviométrico	Código	Área de drenagem (km²)	Lat.	Long.	Órgão Responsável
Moreno	39189560	90,812	-8,1167	-35,1	APAC

Fonte: O Autor (2024).

Figura 21 - Sub-bacia da Estação 39189560.



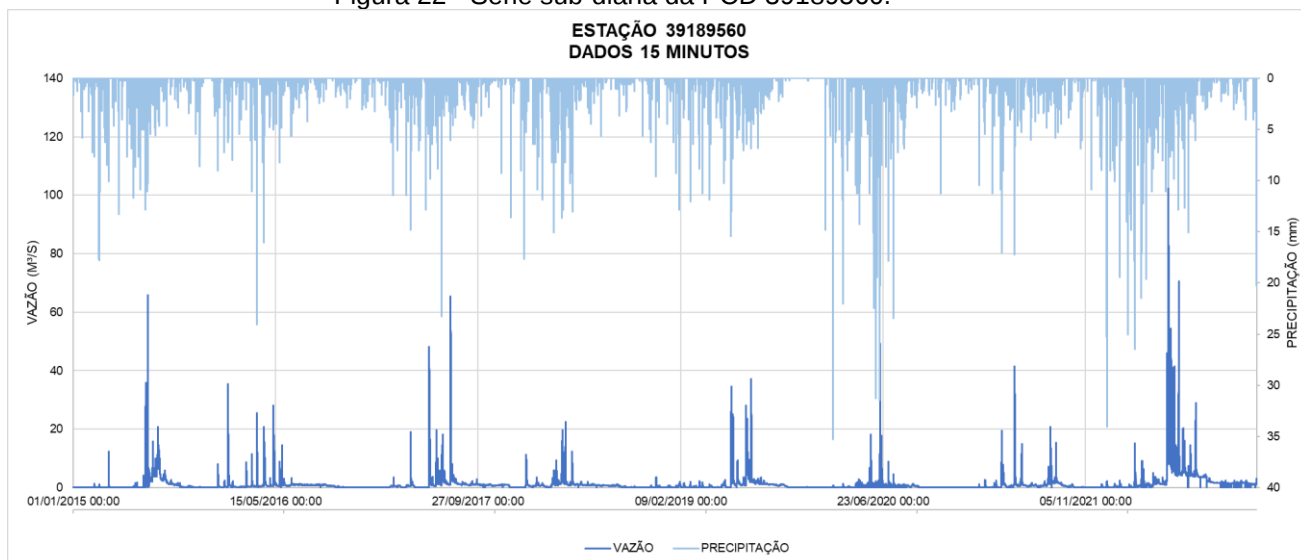
Fonte: O Autor (2024).

A PCD 39189560 possui intervalo de coleta de 15 minutos. Suas atividades foram iniciadas na data 01/05/2012 00:00:00, contudo há longos períodos de falhas entre 2012 e 2014. Para este estudo, foram coletados dados entre 01/01/2015 e 31/12/2022.

Foram avaliadas 2 séries históricas, uma com passo de 15 minutos (

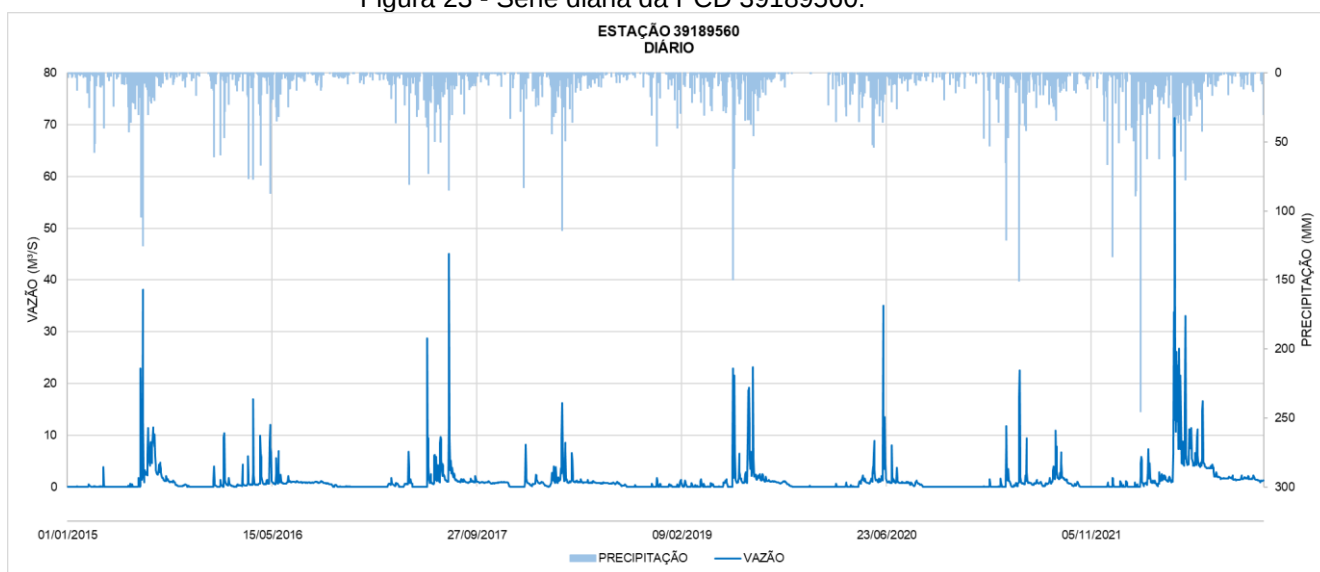
Figura 22) e outra diária (Figura 23). Análises de consistências foram realizados nos dados obtidos nesta estação.

Figura 22 - Série sub-diária da PCD 39189560.



Fonte: O Autor (2024).

Figura 23 - Série diária da PCD 39189560.



Fonte: O Autor (2024).

4.2.3 Dados Pluviométricos

Neste estudo, os intervalos entre os dados das estações sub diárias é de 15 minutos, neste caso foram utilizadas as estações pluviométricas do CEMADEN. Os dados diários de chuva e vazão foram obtidos na plataforma HIDROWEB. Contudo, a ferramenta da ANA também possui uma estação hidrológica na área de estudo, esta é um conjunto de dados de chuva, vazão e nível com intervalos sub horários. Dados de precipitação de 6 estações pluviométricas foram utilizados. As informações

referentes a identificação, localização, tipo de estação e órgão responsável por sua operação estão presentes na Tabela 17.

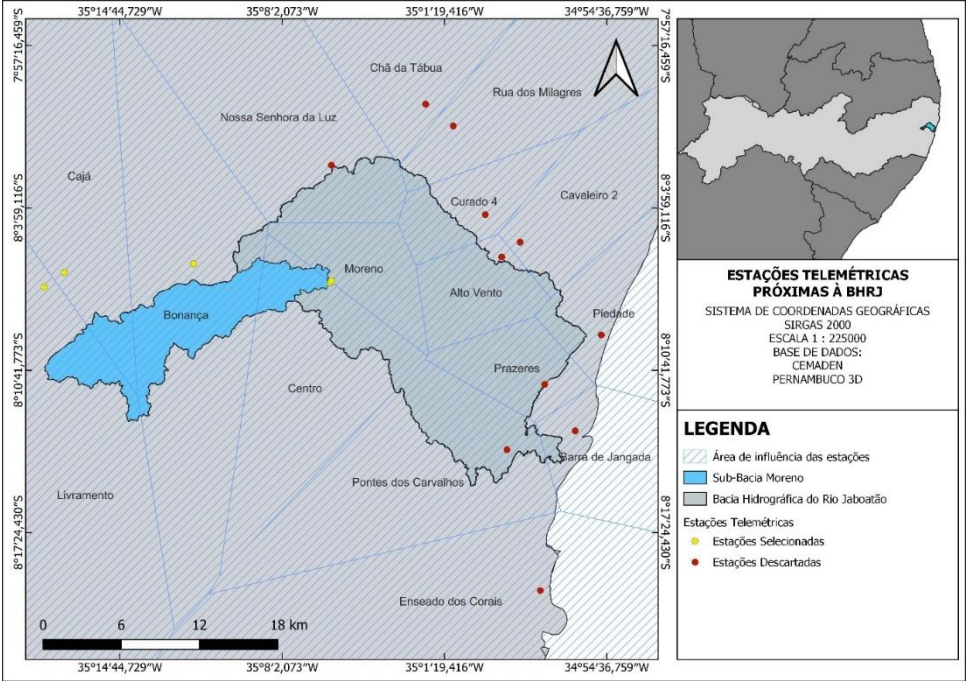
Tabela 17 - Estações pluviométricas selecionadas.

Município	Código	Nome	Lat.	Long.	Tipo	Órgão Responsável
Moreno	260940201A	Bonança	-8,105	-35,195	Telemétrica	CEMADEN
Vitória de Santo Antão	261640703A	Caja	-8,111	-35,284	Telemétrica	CEMADEN
Moreno	260940202A	Centro	-8,118	-35,101	Telemétrica	CEMADEN
Vitória de Santo Antão	261640704A	Livramento	-8,121	-35,298	Telemétrica	CEMADEN
Moreno	39189560	Moreno	-8,1167	-35,1	Hidrológica	APAC
Vitória de Santo Antão	835068	Vitória de Santo Antão	-8,1136	-35,2839	Convencional	CPRM

Fonte: Autor (2024).

As estações com dados sub-horários nas proximidades da área de estudo estão presentes na Figura 24. O Polígono de Voronoi foi utilizado para selecionar os postos com influência dentro da sub-bacia Moreno. Das 16 estações encontradas, apenas 5 foram selecionadas devido a este critério.

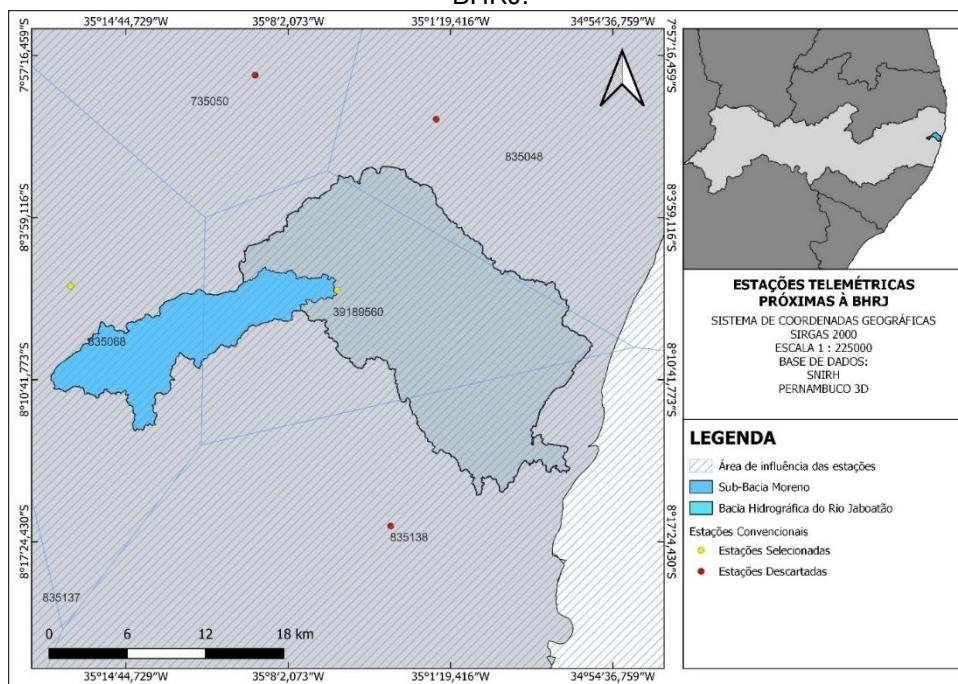
Figura 24 - Levantamento das estações pluviométricas com dados telemétricos nas proximidades da BHRJ.



Fonte: Autor (2024).

Quanto as estações pluviométricas com dados diários, o mesmo processo de triagem foi realizado, conforme a Figura 25. Foram identificadas 5 séries de dados pluviométricos com registros do ano 2022, destas 5, apenas 2 possuem área de influência na sob bacia analisada.

Figura 25 - Levantamento das estações pluviométricas com dados diários nas proximidades da BHRJ.



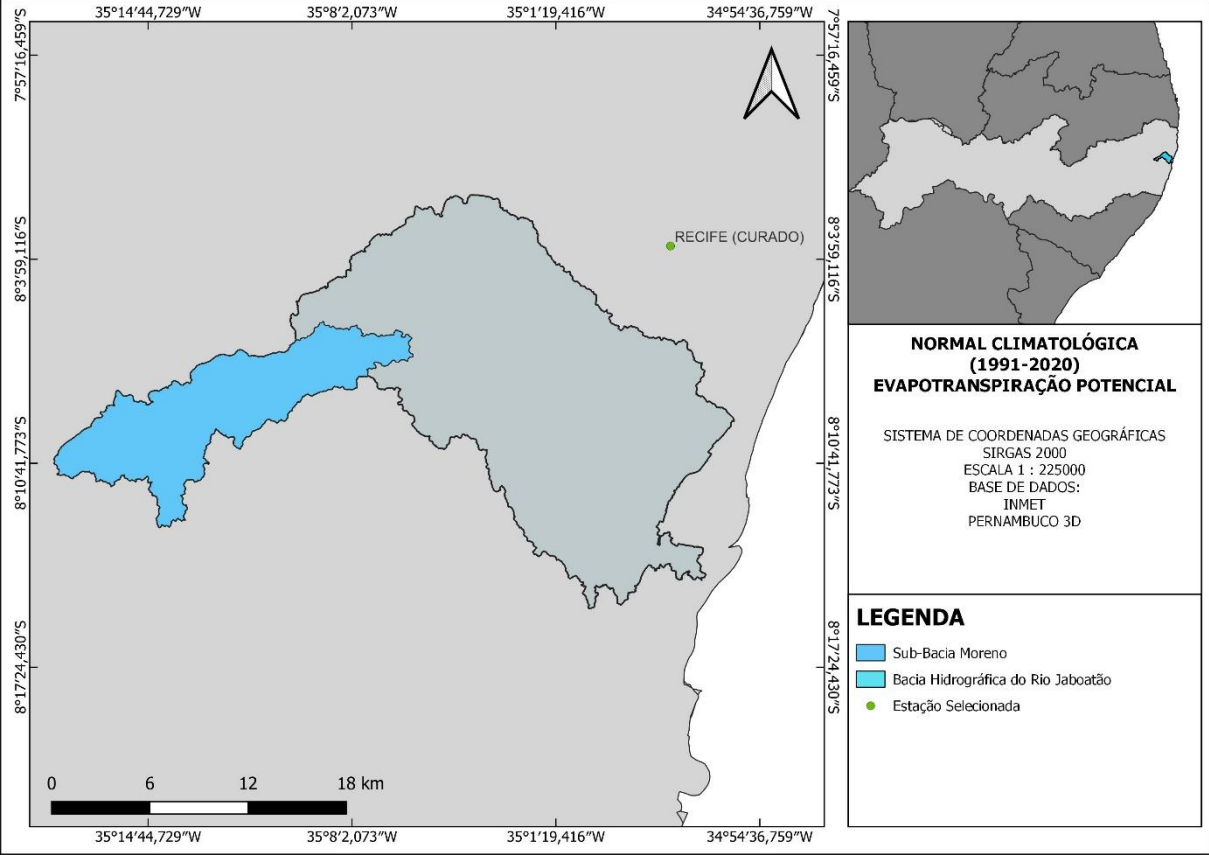
Fonte: Autor (2024).

4.2.4 Dados de evapotranspiração potencial

O banco de dados das Normais Climatológicas do INMET foi utilizado para obter dados de evapotranspiração potencial deste estudo. A Estação Recife (Curado) (código 82900) foi selecionada devido à sua proximidade e semelhanças climáticas com a BHRJ.

A localização da Estação 82900 em relação à BHRJ está representada na Figura 26. As médias mensais de evapotranspiração potencial do período entre os anos de 1991 e 2020 estão presentes na Tabela 18.

Figura 26 – Estação INMET com dados da normal climatológica 1991-2020 selecionada.



Fonte: Autor (2024).

Tabela 18 – Médias mensais da normal climatológica de evapotranspiração Potencial da Estação Recife (Curado).

Mês	Evapo. P.(mm)
Janeiro	178,6
Fevereiro	163,8
Março	177,5
Abril	160,9
Maio	146,5
Junho	124,3
Julho	117,2
Agosto	119,9
Setembro	132,2
Outubro	154,7
Novembro	161,9
Dezembro	176,6

Fonte: INMET (2022).

4.2.5 Preenchimento de falhas pelo método do inverso da distância

Inicialmente, o *software* HIDRO da ANA foi utilizado para identificar as leituras mensais que indicam falhas nas séries históricas, Figura 27. Em seguida, o Método Inverso da Distância Ponderada (IDW) foi empregado para preencher as lacunas das séries temporais. O princípio básico desta metodologia é que os pontos mais próximos de um determinado posto possuem mais semelhança e influência sobre o valor faltante do que os pontos mais distantes (BURROUGH; MCDONELL, 1998).

Figura 27 - Identificação de falhas em séries históricas através do *software* HIDRO 1.4.

Séries													
Série: PIRAPAMA 00835138 (Importado, Bruto, 03/1987 - 04/2023)													
Totais Diários	Gráfico de Totais Diários			Totais Mensais	Máximas Mensais	Dias de Chuva Mensais			Leituras Mensais	Situação Mensal			
Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Máxima
1987				69,3	18,0	22,8	32,0	24,3	14,8	26,6	5,6	6,0	
1988	21,0	12,7	58,6	76,0	68,2	62,2	181,0	26,9	25,0	12,8	32,0	33,2	181,0
1989	30,1	25,0	37,5	94,2	86,2	159,9	94,1	30,1	9,8	8,3	15,6	59,4	159,9
1990	42,0*	19,0	15,2	49,4	54,5	96,7	176,2	62,3	53,4	20,0	11,9		
1991						45,6	97,0	43,8	10,6	80,3	3,2	3,0	
1992	10,0	32,1	81,0	42,5	20,0	134,9			62,8	7,8	10,0	4,5	
1993	4,1	0,0				34,7	66,3	62,1	7,8	8,0	6,8	10,1	
1994	46,9	33,7	30,3	30,7	82,3		93,0	9,9	60,0	20,0	5,5	14,1	
1995	12,6	14,0	140,3	46,5		60,8*	75,7*	20,0	4,7	0,0	34,5	0,0	
1996	25,0*	47,5	13,3	152,9	91,8	118,0	110,0	55,0	29,3	14,3	24,5	5,1	152,9*
1997	6,1	41,5	48,0	106,3	79,4	18,2	26,5	20,0	10,0	3,9	10,5	27,4	106,3
1998	18,6	20,0	20,0	42,7	81,6	25,0	43,6	122,6	11,9	14,7	10,0	6,9	122,6
1999	15,1	14,6	45,3	37,3	65,1	54,9	72,9	23,6	11,8	21,6	23,6	27,9	72,9
2000	46,6	23,7	52,2	61,6	45,6	116,2	74,6	200,6	172,6	16,9	9,9	64,9	200,6
2001	10,3	12,9	28,5	46,9	10,2	81,6	26,6	46,2	21,4	36,2	9,0	10,6	81,6
2002	71,2	42,9	87,8	41,0	38,3	54,2	52,5	17,0	10,0	8,0	29,6	9,9	87,8
2003	23,2	60,2	97,5	83,8	89,1	58,3	23,7?	27,0	43,9	16,7	6,3	16,8	97,5?
2004	67,6	71,2	42,3	41,2	44,9	51,9	41,3	14,6	33,3?	1,2	1,2	3,1	71,2?
2005	5,1	8,9	20,8	24,1	48,6	114,4	43,9	56,1	4,6	16,6	6,1	24,6	114,4
2006	15,9	18,5	32,8	81,7	40,3	57,3	36,8	22,9	49,0	6,2	21,7	49,8	81,7
2007	23,8	41,0	35,4	40,5	41,5	75,5	52,1	29,7	40,8	4,6	9,3	32,0	75,5
2008	0,0	0,0	97,8	66,6	38,5	41,9	33,0	49,3	23,3	26,1	4,8	16,1	97,8
2009	76,9	90,4	39,7	62,5	49,1	84,2	46,6	124,9	17,5	1,0	19,4	16,8	124,9
2010	24,0	13,7	14,0	73,3	23,3	90,6	64,6	33,3	22,0	32,1	2,8	5,0	90,6
2011	32,2	75,4	67,6	77,3	96,4	27,6	60,1	24,1	20,0	10,5	33,0	10,1	96,4
2012	70,1	40,5	23,3	20,0	20,5	98,7	38,4?	20,4	3,7	48,5	0,0	9,6	98,7?
2013	26,3	10,2	29,5	163,6	39,7	36,6	67,6	50,6	47,3	31,1	18,9	21,2	163,6
2014	41,1	20,0	34,6	109,7?	44,8	68,1	19,9	30,1	39,9	55,5?	9,5	19,9	109,7?
2015	13,3	15,3	93,9	25,8	46,8	71,5	148,4	28,6	13,0	16,4	1,5	59,4	148,4
2016	43,7	16,0	91,1	52,0	76,6	45,9	48,7	14,2	25,8	10,7	14,5	6,2	91,1
2017	9,0	29,2	44,5	46,4	135,5	166,6	187,4	20,0		11,5	2,7	40,8	
2018	33,5	119,0	87,3	73,3	37,4	15,0	10,9	39,0	9,2	18,6		30,9	
2019	30,6	10,9	52,8	28,4	44,1	135,1	46,9	77,0	15,6	12,6	2,1	19,5	135,1
2020	0,9	8,9		18,8	30,2	30,1	20,1	14,1	8,0	9,1	2,1	9,0	
2021	12,6	16,2	18,6	90,8	130,8	18,2	12,1	42,2	6,1	18,4	0,9	11,2	130,8
2022			65,8	8,2	160,8	60,6	81,0	13,1	0,9	20,9	17,2	18,2	
2023	18,8	140,6	9,6	59,6									
Média	27,3	33,7	50,2	61,3	60,0	69,5	65,9	42,7	26,9	18,5	11,9	20,1	115,7

* - estimado; ? - duvidoso; \$ - acumulado

Fonte: O Autor (2024).

O valor estimado de precipitação no posto analisado (P_i) pode ser calculado conforme a Equação 25:

$$P_i = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{P_j}{(d_{ij})^p}}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{(d_{ij})^p}} \quad (25)$$

Em que:

- P_j é o valor de precipitação conhecido do ponto j ;
- d_{ij} é a distância entre os pontos;
- p é o parâmetro da influência da distância, neste estudo adota-se $p=2$.

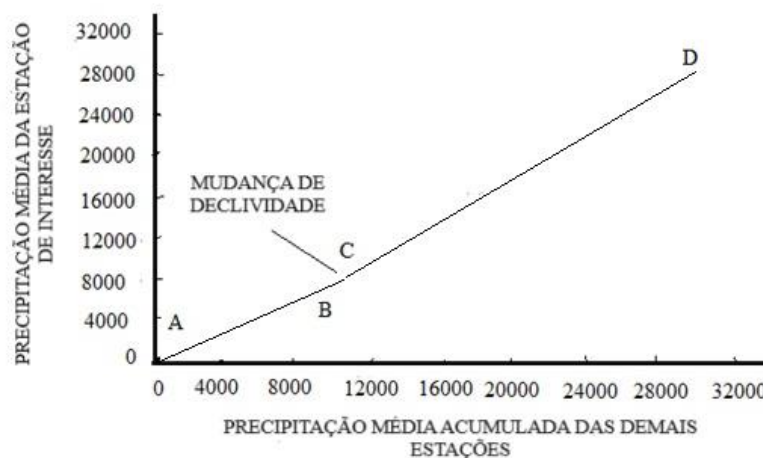
O IDW é amplamente utilizado devido a sua simplicidade e eficácia. Contudo, este método é adequado para o preenchimento de falhas entre estações com semelhanças climáticas. Segundo Lloyd (2005), a escolha do parâmetro p pode impactar nos resultados, sendo necessário uma validação cruzada entre os valores.

Este método foi aplicado para as séries de intervalo de 15 minutos e 24 horas.

4.2.6 Análise de Consistência pelo método da Dupla Massa

Neste estudo, a etapa de análise e consistência dos dados pluviométricos selecionados e com falhas devidamente preenchidas foi realizada pelo método da Dupla Massa, que segundo Bertoni e Tucci (2013), tem como objetivo demonstrar graficamente (Figura 28) o nível de homogeneidade entre as observações entre uma ou mais estações próximas. Este método foi desenvolvido pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS).

Figura 28 - Aplicação do Método da Dupla Massa para a análise de consistência de estações pluviométricas.



Fonte: Adaptada de Laghari (2015).

A análise de Dupla Massa permite identificar mudanças no comportamento da chuva ao longo do tempo. Inicialmente, são calculados os acumulados mensais de todas as estações analisadas. Em seguida, uma estação é selecionada para análise e é realizada uma média dos acumulados das demais estações (BERTONI; TUCCI, 2013). Um gráfico é então plotado, com as médias das estações vizinhas no eixo x e o acumulado da estação analisada no eixo y. Uma análise gráfica deve ser realizada, observando se o gráfico forma uma reta e se há mudanças de inclinação.

4.3 COLETA E PRÉ-PROCESSAMENTO DE DADOS ESPACIAIS

Os dados obtidos nesta etapa do estudo foram analisados e processados no *software* QGIS (Quantum GIS) e HEC-HMS.

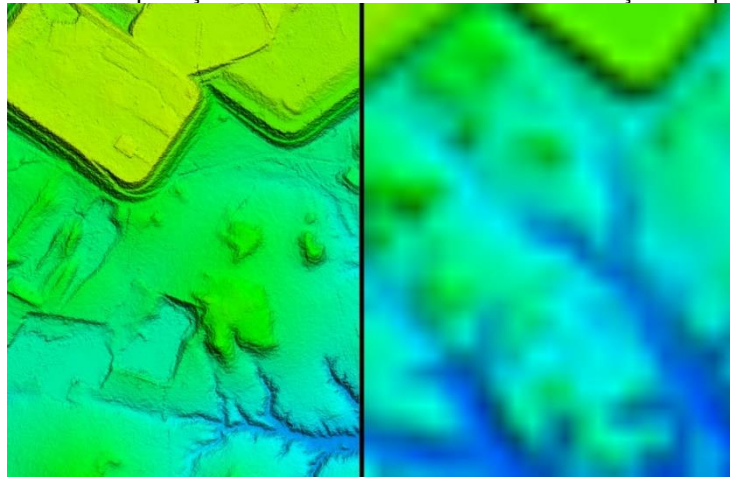
4.3.1 Base de dados espaciais

O Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D) é um importante banco de dados espaciais gratuitos do estado de Pernambuco.

O PE3D foi utilizado para obter o Modelo Digital de Terreno (MDT) da área de estudo. Em comparação com outras bases, como o SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), o PE3D se destaca devido a maior resolução espacial. Enquanto as imagens do SRTM possuem pixels com tamanho de 30 m (NASA, 2000), os MDTs

disponibilizados utilizados possuem pixels de 1 m (PERNAMBUCO, 2016), que garantem uma representação mais precisa do terreno, Figura 29.

Figura 29 - Comparação entre MDTs de diferentes resoluções espaciais.



Fonte: Adaptada de Tecterra Geotecnologias (2021).

4.3.2 Uso e ocupação do solo

A Coleção 8 da base de dados do MapBiomas foi utilizada para as análises de uso e ocupação do solo. Segundo Souza *et al.* (2020), este catálogo utiliza a série histórica de dados dos satélites *Landsat*, com resolução espacial de 30 m, para classificar o uso do solo no período de 1985 a 2022. Mais de 29 classes foram catalogadas, Figura 30.

Figura 30 - Plataforma MapBiomas.



Fonte: Adaptado de MapBiomas (2022).

No presente estudo, a base de dados do ano de 2022 foi selecionada para a análise da cobertura do solo. O arquivo foi disponibilizado em formato Raster abrangendo todo o território brasileiro. A extensão da área de estudo foi selecionada para avaliação.

4.3.3 Mapa Pedológico

Os dados de solos da área de estudos foram obtidos da Feição Pedológica Multiescalar disponibilizada pela ANA (2017). Esta base combina levantamentos realizados pelo IBGE (Cartas na escala 1:250.000) e Embrapa (escala 1:100.000 e 1:250.000), que permite um mapeamento contínuo dos solos do território nacional.

A base está disponibilizada em formato *shapefile* com tabela de atributos com informações de ordem, subordem e textura dos solos.

4.3.4 Pré-processamento da rede de drenagem

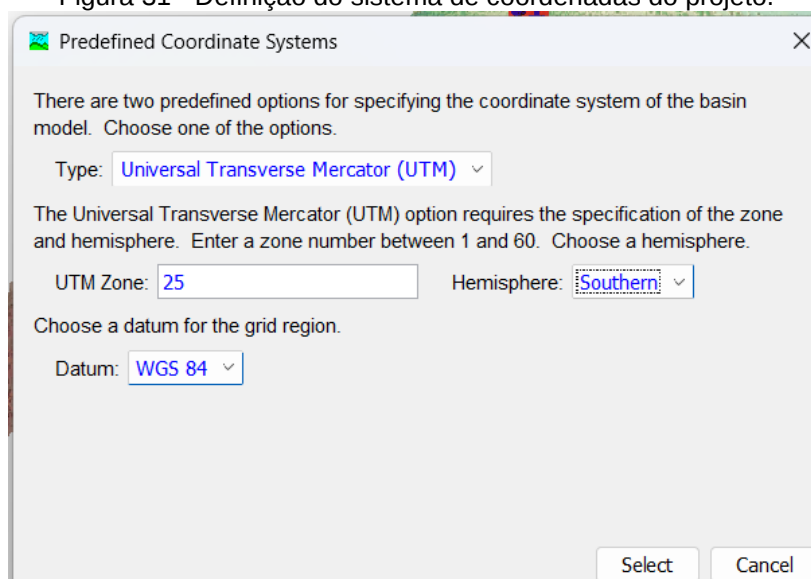
A Estação 39189560 foi utilizada como ponto de calibração e validação dos modelos hidrológicos, a sub-bacia Moreno foi discretizada de duas formas, concentrada e semi-distribuída por sub-bacias, como apresentado na

Figura 5.

O software QGIS, nas versões 2.18 e 3.12, foi utilizado para a obtenção dos dados. O pré-processamento da rede de drenagem foi realizado no HEC-HMS (versão 4.10), conforme descrito no Manual do Usuário (USACE, 2022):

- 1) Inicialmente o sistema de coordenadas deve ser especificado, nas etapas realizadas no HEC-HMS, o *DATUM WGS-84 Fuso 25S* foi selecionado (Figura 31);

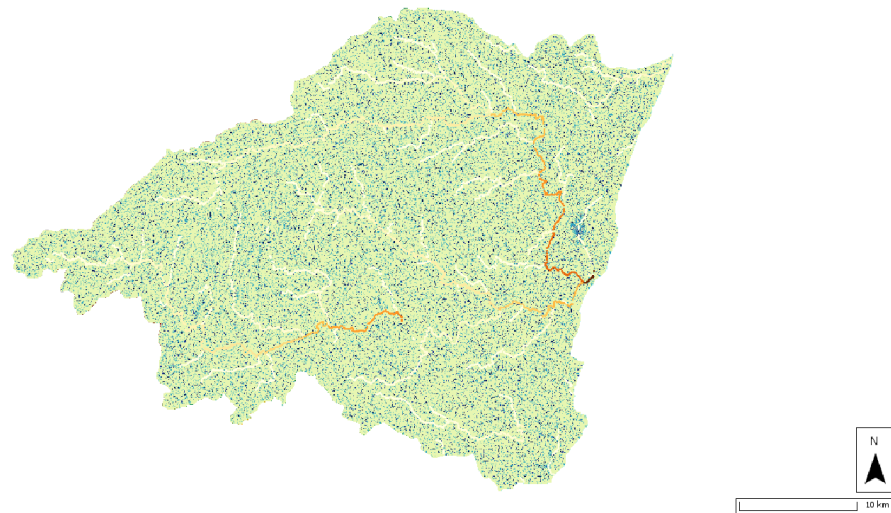
Figura 31 - Definição do sistema de coordenadas do projeto.



Fonte: USACE (2022).

- 2) É possível que o MDT possua alguma leitura de elevação errônea do terreno, por exemplo quando existe algum pixel com elevação mais baixa que seu entorno, prejudicando a análise de escoamento superficial. Logo, a função “*Preprocess Sinks*” é utilizada para corrigir tais erros;
- 3) A função “*Preprocess Drainage*” é utilizada para determinar a direção e acumulação de fluxo (Figura 32).

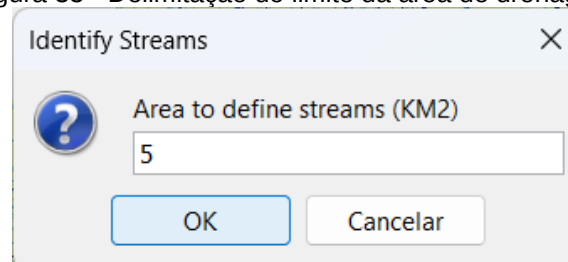
Figura 32 - Rede de drenagem da GL2 pré-processada.



Fonte: O Autor (2024).

- 4) A ferramenta “*Identify Streams*” é utilizada para determinar a rede de drenagem. O usuário deve definir o limite da área de acumulação de drenagem, neste estudo a tal área será de 5 km² (Figura 33);

Figura 33 - Delimitação do limite da área de drenagem.



Fonte: O Autor (2024).

- 5) Com a rede de drenagem definida, o exutório da bacia de estudo deve ser definido pela função “*Break Point*” (Figura 34). Este ponto será utilizado para realizar as análises de performance estatística do modelo.

Figura 34 - Delimitação do exutório do modelo.



Fonte: O Autor (2024).

- 6) A função “*Delineate Elements*” é utilizada para delimitar e nomear os elementos hidrológicos como sub-bacias, canais etc.

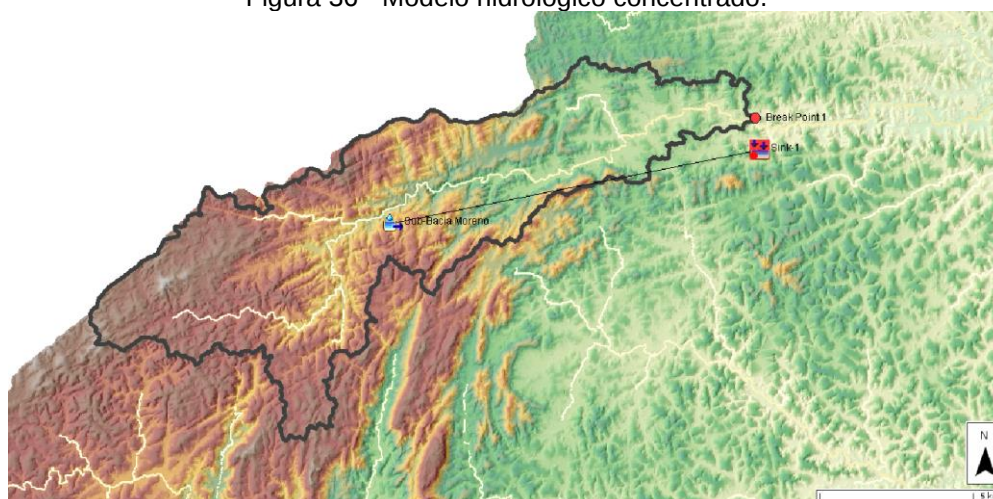
Após a execução das etapas anteriores, foram delimitados os modelos que serão utilizados nas próximas fases dos estudos. A modelagem com distribuição por sub-bacias foi utilizada no Modelo HEC-HMS (Figura 35), enquanto o modelo concentrado foi utilizado na modelagem no CAWM e NCRRT (Figura 36).

Figura 35 – Modelo hidrológico com distribuição por sub-bacias.



Fonte: O Autor (2024).

Figura 36 - Modelo hidrológico concentrado.



Fonte: O Autor (2024).

Após a definição e delimitação dos elementos dos modelos, o HEC-HMS disponibiliza informações morfológicas para a determinação de diversos parâmetros de entrada. Sendo disponível as declividades médias das bacias, comprimento e declividade do principal curso d'água, áreas, maior comprimento do curso d'água etc.

4.4 CÁLCULO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA DOS MODELOS HIDROLÓGICOS

Este capítulo aborda os procedimentos necessários para a obtenção dos parâmetros de entrada para ambos os modelos concentrado e distribuído por sub-bacias (Figura 35 e Figura 36).

4.4.1 Tempo de concentração e *Lagtime*

Para este estudo, foi adotado o método de Kirpich para a estimativa do tempo de concentração, Equação 26.

$$t_c = 0,0663 * L^{0,77} * S^{-0,385} \quad (26)$$

Onde:

- T_c , o tempo de concentração, em horas;
- L , o comprimento do curso d'água principal, em km;

- S, declividade do curso d'água principal, em m/m.

4.4.2 Cálculo do Curve Number, Parâmetro S e Abstração inicial

O CN pode ser estimado por meio de técnicas de geoprocessamento que combina dados espaciais com tabelas de referência disponíveis na literatura (Tabela 3)

A estimativa do CN das bacias analisadas deste estudo foi realizada no *software* Qgis, baseada na metodologia apresentada nos estudos de Anjinho *et al.* (2018):

- 1) Definição da área de estudo: Inicialmente, deve ser criado um *shapefile* da área de estudo, este arquivo pode conter as sub-bacias da área de drenagem;
- 2) Coleta de dados espaciais: Conforme apresentado nos itens 4.3.2 e 4.3.3, os dados de cobertura e tipo de solo serão utilizados para a estimativa do CN. Tais camadas devem ser recortadas para o tamanho da área de interesse;
- 3) Grupo hidrológico dos solos: Ao analisar a camada dos tipos de solo, deve ser identificadas as classes presentes na região de estudo. Com base na Tabela 19 proposta nos estudos de Anjinho *et al.*, (2018), a tabela de atributos da camada pedológica deve ser editada para inserir tal classificação;

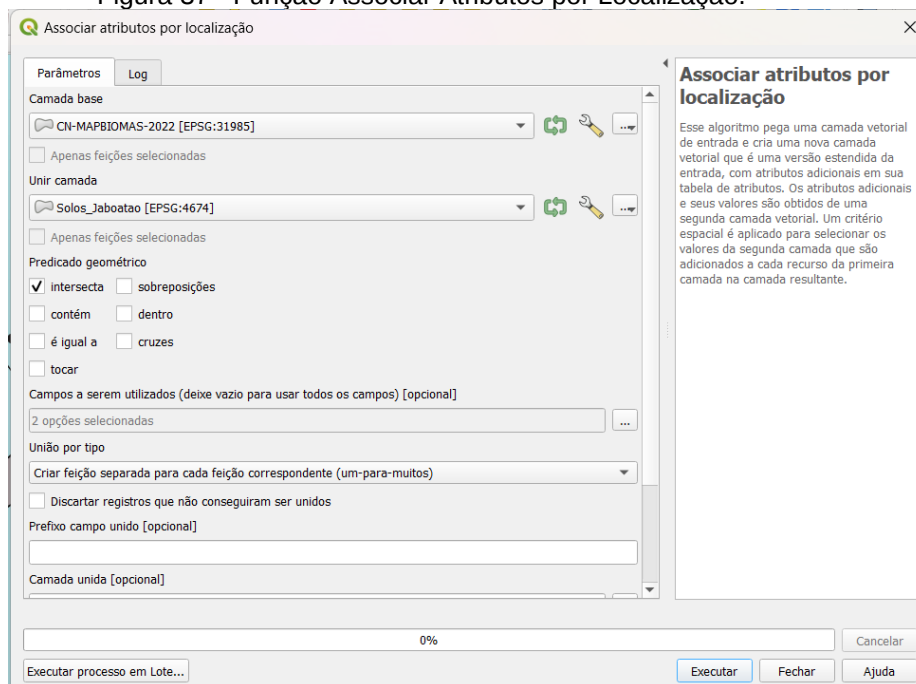
Tabela 19 - Classificação hidrológica do solo para as condições brasileiras.

Grupo	Características	Tipos de solo
A	Solos muito profundos (> 200 cm), com alta taxa de infiltração e resistência e tolerância a erosão, solos porosos com baixo gradiente textural (< 1,20), textura média, solos bem drenados ou excessivamente drenados.	Latossolo Amarelo, Latossolo Vermelho Amarelo, Latossolo Vermelho, ambos de textura argilosa ou muito argilosa e com alta macroporosidade; Latossolo amarelo e Latossolo Vermelho Amarelo, ambos de textura média, mas com horizonte superficial não arenoso.
B	Solos profundos (100 a 200 cm), com moderada taxa de infiltração e resistência e tolerância a erosão, solos porosos variando com gradiente textural variando entre 1,20 e 1,50, textura arenosa ao longo do perfil ou de textura média.	Latossolo Amarelo e Latossolo Vermelho Amarelo, ambos de textura média, mas com horizonte superficial de textura arenosa; Latossolo Bruno; Nitossolo Vermelho; Neossolo Quartzarênico; Argissolo Vermelho ou Vermelho Amarelo de textura arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa ou argilosa/muito argilosa que não apresentam mudança textural abrupta
C	Solos profundos (100 a 200 cm) ou pouco profundos (50 a 100 cm), baixa taxa de infiltração e baixa resistência a erosão, são solos com gradiente textural maior que 1,50, solos associados a argila de atividade baixa (Tb).	Argissolo pouco profundo, mas não apresentando mudança textural abrupta ou Argissolo Vermelho, Argissolo Vermelho Amarelo e Argissolo Amarelo, ambos profundos e apresentando mudança textural abrupta; Cambissolo de textura média e cambissolo háplico ou húmico, mas com características físicas semelhantes aos Latossolos (latossólico); Espodossolo Ferrocárbico; Neossolo Flúvico.
D	Solos de taxa de infiltração muito baixa oferecendo pouquíssima resistência a erosão, solos rasos (< 50 cm), solos pouco profundos associados à mudanças textural abrupta, solos argilosos associados à argila de atividade alta (Ta), solos orgânicos.	Neossolo Litólico; Organossolo; Gleissolo; Chernossolo; Planossolo; Vertissolo; Alissolo; Luvissolo; Plintossolo; solos de mangue; afloramentos de rocha; Cambissolos que não se enquadram no grupo C; Argissolo Vermelho Amarelo e Argissolo Amarelo, ambos pouco profundos e associados à mudança textural abrupta.

Fonte: Anjinho *et al.*, (2018).

- 4) Combinação de dados espaciais: A função “Associar atributos por localização” é utilizada para inserir as informações da etapa anterior na camada de uso e ocupação. Logo, cada feição com seu tipo de uso, agora terá informações do seu tipo de solo e o grupo hidrológico (Figura 37).

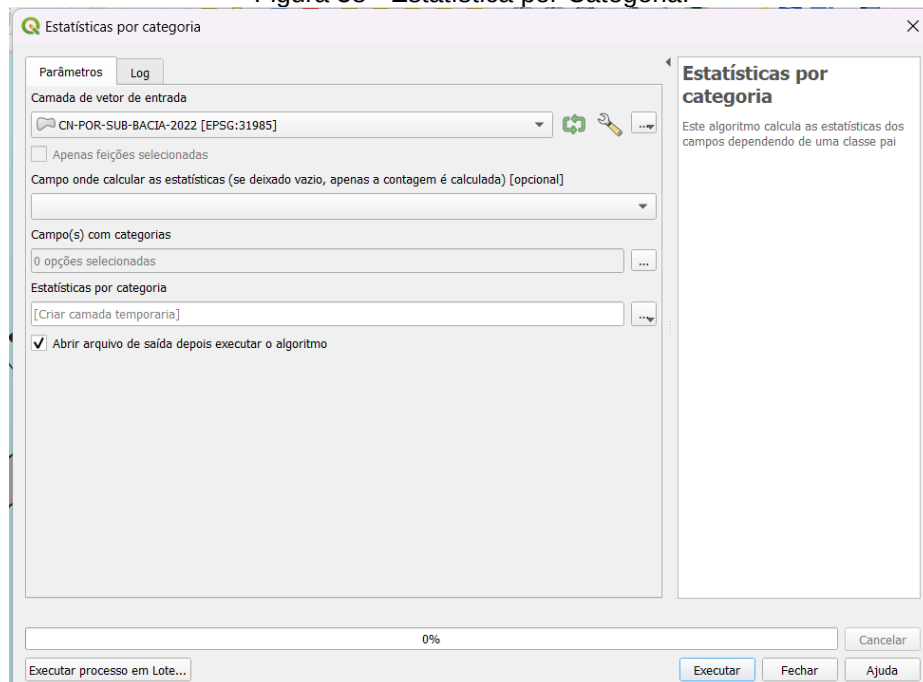
Figura 37 - Função Associar Atributos por Localização.



Fonte: O Autor (2024).

- 5) Cálculo do CN: Por meio da calculadora de campo da tabela de atributos da camada com dados de cobertura e grupo hidrológico do solo, é possível estimar o CN de cada feição de acordo com Tabela 3. Ao final, uma camada com valores contínuos de CN será criada;
- 6) Atribuir sub-bacias: O passo 4 deve ser realizado novamente para atribuir a camada do CN contínuo qual sub-bacia que a feição está localizada;
- 7) CN médio: A função “Estatísticas por Categorias” deve ser utilizada para calcular o CN médio de cada sub-bacia (Figura 38). A saída desta função é uma tabela com o CN médio de cada área.

Figura 38 - Estatística por Categoria.



Fonte: O Autor (2024).

- 8) Finalização: A tabela gerada no passo anterior pode ser atribuída ao *shapefile* das sub-bacias, logo, a camada final com o CN médio de cada bacia será criada.

Dados os valores de *Curve-Number* de cada sub-bacia, a capacidade máxima de retenção do solo e as perdas iniciais podem ser estimadas por meio das Equações 5 e 6, respectivamente.

4.5 PLANO DE TRABALHO DOS MODELOS HIDROLÓGICOS

Este capítulo aborda a aplicação de diferentes ferramentas de modelagem hidrológica, ao explanar o passo a passo e suas particularidades.

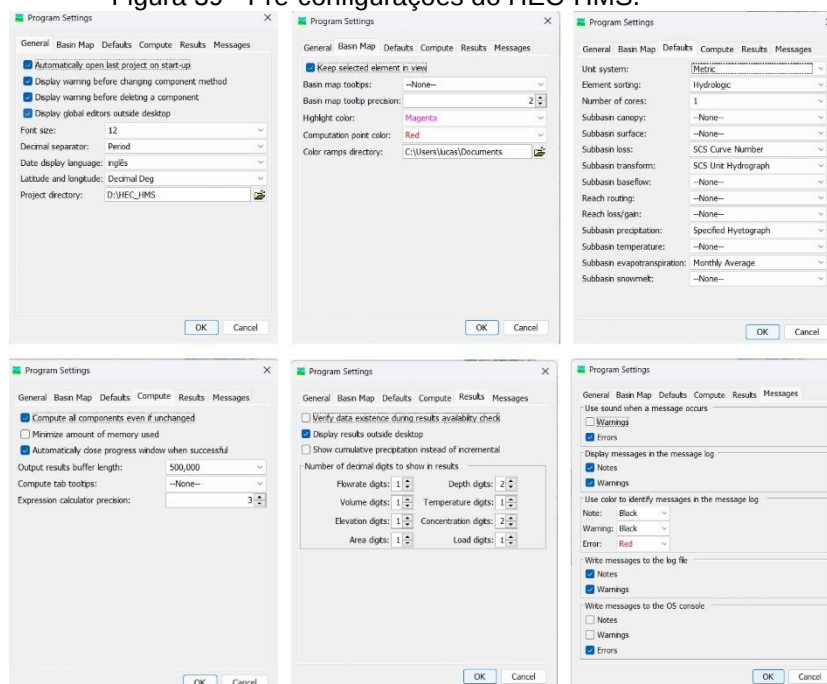
4.5.1 Modelagem no HEC-HMS

O modelo aplicado neste estudo seguiu os critérios e premissas estabelecidos no Manual do Usuário (USACE, 2022). Na Figura 7 é apresentado o fluxograma de trabalho, que é dividido entre pré-configuração do programa, definições dos modelos, dados de entrada, geoprocessamento, definição dos processos, controles de tempo e simulações.

4.5.1.1 Pré-configuração do programa

A pré-configuração do HEC-HMS deve ser realizada após a instalação do programa. Nesta etapa são definidos os padrões que serão utilizados em todas as simulações, como: sistema de unidades, separador decimal, fonte, formato da latitude e longitude, padrões dos resultados etc. As opções disponíveis nesta etapa são representadas na Figura 39.

Figura 39 - Pré-configurações do HEC-HMS.



Fonte: O Autor (2024).

Esta etapa não é obrigatória, contudo, a sua execução reduz o trabalho repetitivo entre diversos projetos.

4.5.1.2 Modelos de bacia, Modelos meteorológicos e Elementos Compartilhados

A criação desses componentes é realizada em paralelo devido a dependência cruzada entre os elementos. Os modelos de bacia abrigam o MDT do terreno, as sub-bacias com suas características, os processos hidrológicos etc. Já os modelos meteorológicos armazenam as séries históricas de precipitação, evapotranspiração potencial e modelo de precipitação. Enquanto os elementos compartilhados são séries

de dados diversos, dentre eles informações das estações fluviométricas como séries de vazão e nível (USACE, 2022).

Após a definição e criação dos elementos citados acima, o usuário deve inserir os dados de entrada:

- **Modelo de bacia:** MDT da área de estudo;
- **Modelo meteorológico:** Estações pluviométricas com suas respectivas séries históricas, dados de evapotranspiração potencial etc.;
- **Elementos compartilhados:** Qualquer dado complementar que irá aumentar o nível de detalhamento do modelo, dentre eles as séries de dados de estações fluviométricas.

A metodologia para o processamento da drenagem e delimitação dos componentes hidrológicos foi descrita no item 4.3.4.

O modelo meteorológico aplicado neste estudo é a precipitação interpolada (*Interpolated precipitation*) pelo método IDW.

4.5.1.3 Processos Hidrológicos

Os Processos Hidrológicos abordados neste item foram apresentados na Tabela 6. As configurações definidas para este estudo estão presentes na Figura 40.

Figura 40 - Configurações do componente hidrológico sub-bacia.

Subbasin	Loss	Transform	Baseflow	Options
Basin Name: Moreno				
Element Name: Sub bacia 1				
Description:				
Downstream:	J1			
*Area (KM2)	9.9337			
Latitude Degrees:	-8.11849			
Longitude Degrees:	-35.15859			
Discretization Method:	--None--			
Canopy Method:	--None--			
Snow Method:	--None--			
Surface Method:	--None--			
Loss Method:	SCS Curve Number			
Transform Method:	SCS Unit Hydrograph			
Baseflow Method:	Recession			

Fonte: O Autor (2024).

Os métodos adotados e seus dados de entrada para as sub-bacias estão presentes na Tabela 20.

Tabela 20 - Processos Hidrológicos adotados para as sub-bacias.

PROCESSO HIDROLÓGICO	MÉTODO ESCOLHIDO	ENTRADA
Perdas	SCS Curve Number	CN e abstração inicial
Transformação Chuva- Vazão	Hidrograma Unitário do SCS	<i>Lagtime</i>
Vazão de base	Recessão	Razão entre a Vazão inicial no instante 0 pela área total da bacia

Fonte: O Autor (2024).

Para os trechos d'água, o método de propagação de cheias Muskingum-Cunge foi selecionado devido a simplicidade em obter os parâmetros de entrada do modelo, sendo:

- Comprimento do trecho, em metros;
- Declividade, em m/m;
- Rugosidade (Número de Manning);
- Largura do fundo do canal (obtido por geoprocessamento), em m;
- Formato do canal;
- Inclinação da parede do canal.

Na Tabela 21 são apresentados os valores do coeficiente de rugosidade adotado para canais naturais.

Tabela 21 - Valores de coeficiente de rugosidade para canais abertos.

Canais Naturais	Valores de n		
	Mínimo	Normal	Máximo
Reto, Limpo, sem represamento	0,025	0,030	0,033
Sinuoso, limpo, com pouco represamento	0,033	0,040	0,080
Vagaroso, com vegetação rasteira	0,050	0,070	0,080
Planície de inundação, pastagem	0,025	0,030	0,035
Idem, com poucos arbustos e árvores	0,035	0,050	0,060

Fonte: Adaptado de Tolentino Jr. (2023).

4.5.1.4 Especificações de Controle e Simulação

As especificações de controle são necessárias para definir o período e o passo de tempo da simulação. Esta ferramenta permite que o usuário crie diferentes intervalos que correspondem aos diversos eventos simulados.

O componente simulação permite que o usuário selecione a especificação de controle para o evento desejado e os modelos de bacia e meteorológico. Ao criar esse elemento, o usuário poderá executar o modelo hidrológico.

Neste estudo, para as simulações com passo de tempo diários, foram avaliadas series contínuas e mensais. Para o passo de tempo de 15 minutos, foram avaliados eventos específicos com duração variada.

4.5.1.5 Calibração e validação no HEC-HMS

A avaliação do desempenho estatísticos dos modelos desenvolvidos no HEC-HMS é realizada por meio dos índices NSE, Pbias e RSR.

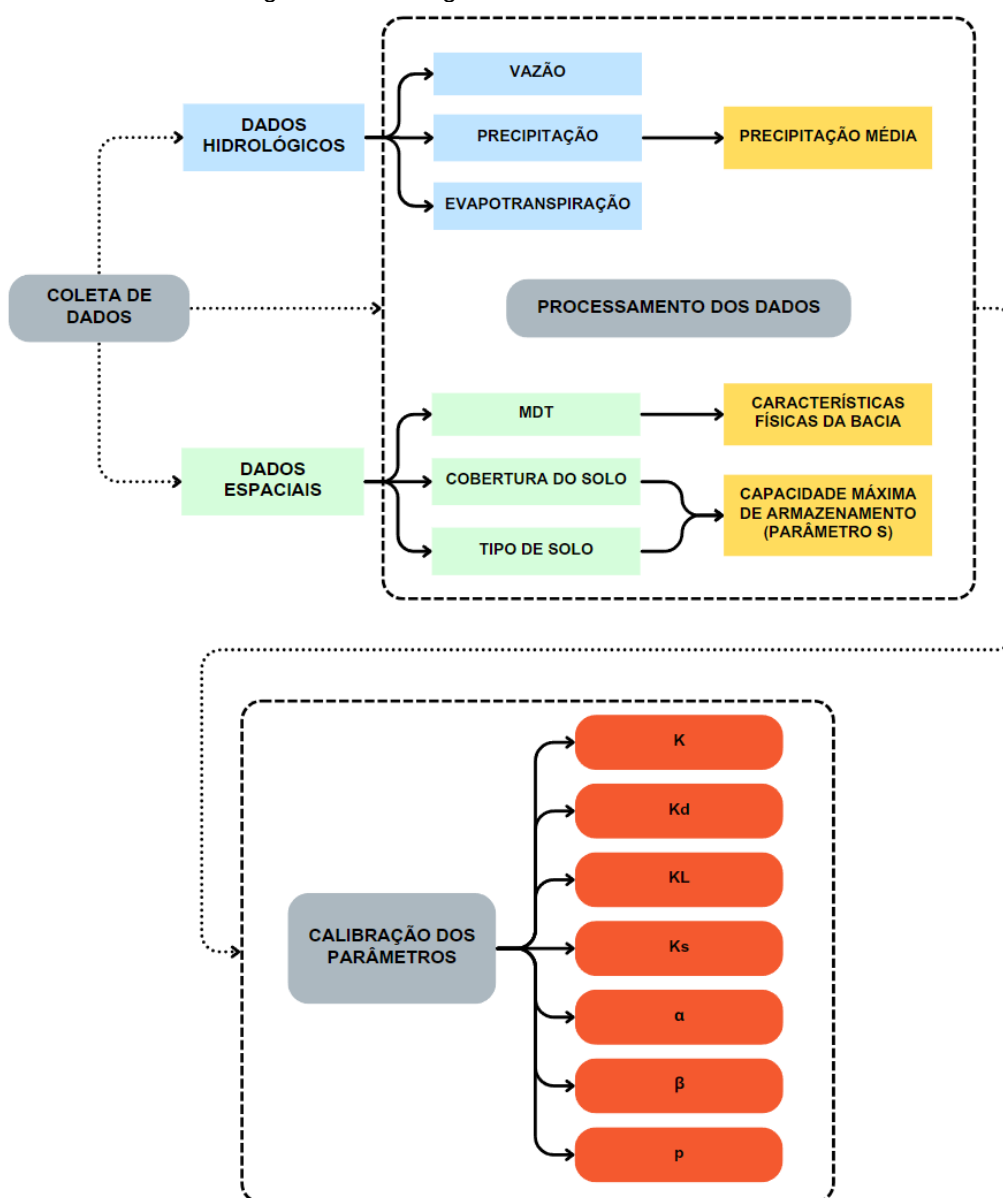
A calibração é realizada ao comparar os resultados da simulação com os dados de vazão medidos na estação fluviométrica. Os parâmetros (CN, *Lagtime* e Ia) devem ser ajustados para que os indicadores estatísticos atinjam os intervalos aceitáveis estabelecidos na Tabela 8.

A validação é realizada de maneira semelhante à calibração, sendo necessário alterar as especificações de controle para outros intervalos de tempo. O desempenho estatístico comprova a confiabilidade do modelo, assim podendo ser aplicado em diversos eventos com segurança estatística.

4.5.2 Modelagem no CAWM

O modelo aplicado neste estudo seguiu os critérios estabelecidos no Memorial Descritivo do CAWM (CIRILO, 2021). O fluxograma de trabalho é resumido entre 3 fases: coleta de dados, processamento de dados e calibração dos parâmetros, conforme a Figura 41.

Figura 41 - Fluxograma de trabalho do CAWM.



Fonte: O Autor (2024).

A versão do CAWM implementado neste estudo está no formato de planilha do EXCEL.

A discretização espacial concentrada foi definida como padrão para este estudo.

Foram realizadas simulações com intervalos de tempo de 15 minutos e de 1 dia.

4.5.2.1 Dados de entrada do modelo

Os parâmetros de entrada necessários para a inicialização do CAWM V estão presentes na Tabela 22. A precipitação média, vazão e evapotranspiração potencial são fornecidos ao sistema via arquivos de texto, nos quais serão utilizados para a criação da planilha de calibração. Os dados morfológicos, como área da bacia, comprimento da rede de drenagem e inclinação do canal são obtidos conforme o item 4.3.4.

Tabela 22 - Parâmetros de entrada do modelo CAWM.

PARÂMETRO/ DADO	UNIDADE
Precipitação média	mm/dia
Vazão	m ³ /s
Evapotranspiração Potencial	mm/dia
Área da bacia (A _b)	km ²
Comprimento da rede de drenagem (L _d)	m
Inclinação do canal principal (I)	m/m
Tempo de concentração (T _c)	dia
Capacidade máxima de armazenamento (S)	mm

Fonte: O Autor (2024).

4.5.2.2 Calibração e validação do modelo CAWM

A etapa de calibração do modelo é realizada em curtos períodos da série histórica. O CAWM dispõe das ferramentas de otimização do Excel, como o solver, que aplica funções objetivo alterando algumas variáveis a fim de maximizar (ou minimizar) algum parâmetro. Para este estudo, a função objetivo maximizou o NSE, ao calibrar os valores de K, K_s, K_L e β . Os valores de α e p são alternados pelo usuário, o CAWM fornecesse intervalos padrões para estes elementos. O K é calculado antes da simulação, podendo ser estimado por meio dos parâmetros da bacia ou por sua área. Os intervalos recomendados pelo programa estão presentes na Tabela 23.

Tabela 23 - Intervalos recomendados para as variáveis do modelo CAWM.

VARIÁVEL	INTERVALO
K	0,01 a 0,06
α	1,4 (padrão)
β	2 (referência)
p	1 a 2

Fonte: O Autor (2024).

A etapa de validação foi realizada ao definir os intervalos desejados.

4.5.2.3 Ajuste para simulações sub-diárias no CAWM

Conforme o memorial descritivo do CAWM, este modelo foi desenvolvido inicialmente para a simulação em passo de tempo diário devido à dedução do coeficiente de escoamento superficial K (CIRILO, 2021). Este parâmetro foi estudado em dezenas de bacias durante a concepção do CAWM. Na Equação 27 é demonstrado que o K depende do intervalo de tempo entre as simulações e as características da bacia analisada.

$$K = \frac{\Delta t}{n} \cdot \left(\frac{c^2 \cdot A_b^2}{B_e^2 \cdot L_T^5} \right)^{\frac{1}{3}} S_0^{\frac{1}{2}} \quad (27)$$

Sendo:

- Δt , o passo de tempo das simulações, em segundos;
- B_e , a largura equivalente de seção retangular, em m;
- L_t , o comprimento total da rede de drenagem, em m;
- A_b , a área da bacia, em m²;
- S_0 , a declividade equivalente da bacia, em m/m;
- c , uma constante igual a 1000;
- n , o coeficiente de rugosidade de Manning.

Campos (2023) adaptou o modelo CAWM para simulações sub-diárias com passo de tempo de 15 minutos (padrão adotado para a maioria das estações telemétricas) e recomendou:

- Δt igual a 900 segundos;

- Os dados de evapotranspiração devem estar compatíveis com o passo de tempo adotado;
- Uso da metodologia de otimização “GRG Não Linear”;
- A maximização da relação NSE/MAE (desvio médio absoluto entre as vazões medidas e simuladas);
- Otimização dos seguintes parâmetros de acordo com os intervalos:
 - i) o coeficiente de escoamento K varia entre 0,0001 e 0,1;
 - ii) os parâmetros Ks e KL variam entre 0,1 e 1;
 - iii) o β varia entre 1 e 20 e o p entre 1 e 2.

Para este estudo, o intervalo das simulações para o modelo sub-diário foi de 15 minutos, e os dados de evapotranspiração foram adaptados conforme a Tabela 24. A rotina de cálculo do CAWM necessita de médias mensais coerentes com o passo adotado. Contudo, neste estudo foram aplicados valores uniformes médios por mês.

Tabela 24 - Evapotranspiração Potencial a cada 15 minutos da Estação Recife (Curado).

Mês	Evapo. P.(mm)
Janeiro	0.0600
Fevereiro	0.0609
Março	0.0596
Abril	0.0559
Maio	0.0492
Junho	0.0432
Julho	0.0394
Agosto	0.0403
Setembro	0.0459
Outubro	0.0520
Novembro	0.0562
Dezembro	0.0593

Fonte: Adaptado de INMET (2022).

4.5.3 Modelagem no NCRRT

A ferramenta NCRRT apresenta um conjunto diferentes modelos hidrológicos com mesma metodologia de execução.

4.5.3.1 Dados de entrada dos modelos

As entradas dos modelos devem ser disponibilizadas em um arquivo texto com os dados organizados em colunas, sem cabeçalhos, Figura 42. Os dados são dispostos em ano, mês, dia, precipitação (mm/dia), evapotranspiração potencial (mm/dia), vazão (m³/s), temperatura mínima (°C) e temperatura máxima (°C).

Figura 42 - Arquivo de entrada do NCRRT.

2015	1	1	1.864	5.167741935	0.07	21.793548	31.056667
2015	1	2	3.100	5.167741935	0.085416667	21.793548	31.056667
2015	1	3	0.254	5.167741935	0.099375	21.793548	31.056667
2015	1	4	0.000	5.167741935	0.070238095	21.793548	31.056667
2015	1	5	0.000	5.167741935	0.06	21.793548	31.056667
2015	1	6	0.127	5.167741935	0.060208333	21.793548	31.056667
2015	1	7	0.464	5.167741935	0.075416667	21.793548	31.056667
2015	1	8	0.000	5.167741935	0.074583333	21.793548	31.056667
2015	1	9	0.291	5.167741935	0.072083333	21.793548	31.056667
2015	1	10	0.064	5.167741935	0.075416667	21.793548	31.056667
2015	1	11	1.292	5.167741935	0.083854167	21.793548	31.056667
2015	1	12	1.001	5.167741935	0.095	21.793548	31.056667
2015	1	13	0.064	5.167741935	0.095416667	21.793548	31.056667
2015	1	14	0.064	5.167741935	0.087708333	21.793548	31.056667

Fonte: O Autor (2024).

Os valores médios mensais de evapotranspiração e temperaturas mínimas e máximas para a Normal Climatológica da estação Curado estão presentes na Tabela 25.

Tabela 25 - Médias mensais da Normal Climatológica utilizada.

Mês	Evapotranspiração. Potencial (mm/dia)	Temperatura mínima (°C)	Temperatura máxima (°C)
Janeiro	5,76	23,10	30,80
Fevereiro	5,85	23,30	31,00
Março	5,73	23,20	30,90
Abril	5,36	22,80	30,40
Maio	4,73	22,30	29,60
Junho	4,14	21,50	28,50
Julho	3,78	21,00	27,90
Agosto	3,87	20,70	27,90
Setembro	4,41	21,50	28,60
Outubro	4,99	22,40	29,60
Novembro	5,40	22,80	30,40
Dezembro	5,70	23,00	30,80

Fonte: Adaptado de INMET (2022).

A entrada de precipitação média dos modelos foi calculada com base nas estações dispostas na Figura 25.

O NCRRT necessita de um período de aquecimento de pelo menos 365 dias para inicializar os modelos.

4.5.3.2 Calibração dos modelos do NCRRT

O passo a passo para calibrar os modelos é bastante simplificado, baseado na Figura 10 o usuário deve:

- 1) Selecionar o modelo desejado;
- 2) Informar o período de calibração e a área da bacia;
- 3) Inserir o arquivo de entrada;
- 4) Executar a otimização.

Após a execução dos passos anteriores, deve ser realizada uma análise dos parâmetros obtidos, verificando o seu significado físico e as métricas estatísticas. Em seguida, a validação dos modelos pode ser realizada ao informar o período de análise (*“Simulation Period”*).

4.6 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO CAWM EM DIFERENTES METODOLOGIAS DE ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL

4.6.1 Estimativa de evapotranspiração potencial com o *pyet*

O *pyet* é uma biblioteca de código aberto em linguagem de programação *Python*, que permite a estimativa de evapotranspiração potencial (VREMEC *et al.*, 2023). Series temporais de estações e dados espaciais podem ser utilizados as estimativas.

Foram utilizadas as medições de temperatura, umidade do ar, velocidade do vento e demais dados coletados na Estação Recife (Curado). Os métodos de evapotranspiração avaliados e os dados de entrada utilizados estão dispostos na Tabela 26.

Tabela 26 - Metodologias e dados de entradas utilizados para a estimativa de evapotranspiração potencial utilizados.

Método	Referência	Dados de Entrada
Penman	Penman (1948)	Temperatura média, umidade média, insolação
Penman-Monteith	Monteith (1965)	média, insolação total em horas,
FAO-56	Allen <i>et al.</i> (1998)	velocidade do vento, latitude e elevação
Blaney-Criddle	Blaney <i>et al.</i> (1952)	
Hargreaves	Hargreaves e Samani (1982)	

Fonte: Adaptado de Vremec *et al.* (2023).

Dados do período entre 01/01/1991 e 31/08/2020 foram utilizados para estimar as médias mensais de evapotranspiração potencial para a área de estudo.

4.6.2 Adaptação do CAWM para diferentes metodologias de evapotranspiração potencial

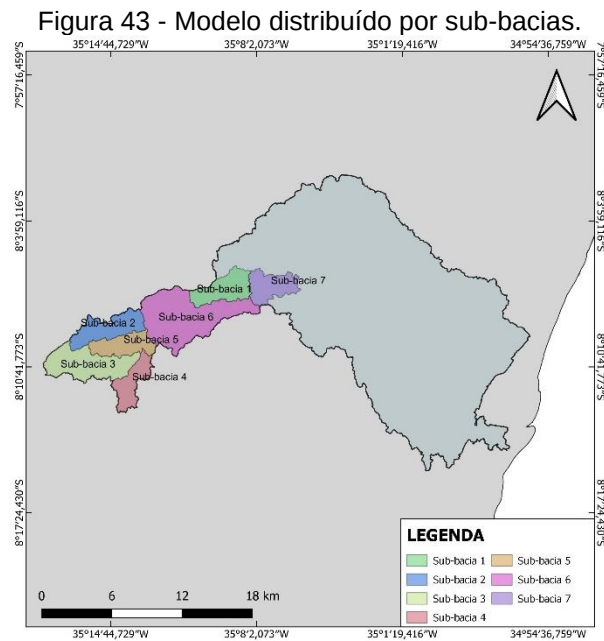
Inicialmente, o modelo CAWM foi calibrado conforme as recomendações de Cirilo *et al.* (2020), em seguida as entradas de médias diárias mensais de evapotranspiração foram alteradas para corresponder a cada metodologia avaliada. Os demais processos de estimativa de evapotranspiração imediata e complementar foram mantidas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

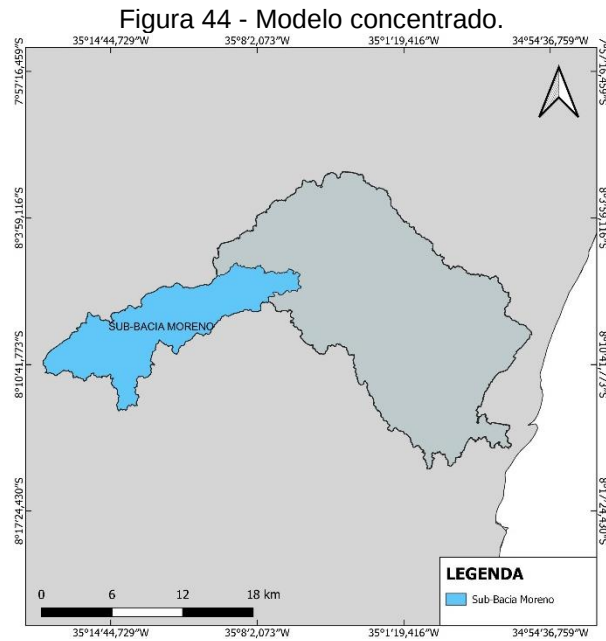
Este capítulo apresenta os resultados obtidos para os diversos modelos hidrológicos apresentados neste estudo.

5.1 CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO

Na Figura 43 e na Figura 44 são apresentados os modelos distribuídos por sub-bacias e concentrado elaborados para este estudo.



Fonte: O Autor (2024).



Fonte: O Autor (2024).

Observa-se que o modelo distribuído foi dividido em 7 sub-bacias enquanto o modelo concentrado agrupa todas as sub-bacias para formar a sub-bacia Moreno.

As informações das sub-bacias que foram estimados via metodologia descrita anteriormente estão presentes na Tabela 27. O tempo de concentração e o *lagtime* foram calculados por meio da formulação de Kirpich (Equação 26). Os valores de CN foram calibrados para o ano de 2022, observa-se uma proximidade entre os valores.

Tabela 27 - Características morfométricas das sub-bacias.

Sub-bacia	Área (km²)	Área imper. (%)	L. canal principal (km)	I. canal principal (m/m)	CN	S (mm)	Ia (mm)	Tc (min)	Lagtime (min)
Sub-bacia 1	9,93	0	10,25	0,019	72	98,78	19,76	109,8	65,88
Sub-bacia 2	10,79	0	9,97	0,024	67	125,10	25,02	98,28	58,96
Sub-bacia 3	16,23	0	13,66	0,016	73	93,95	18,79	146,28	87,78
Sub-bacia 4	7,93	0	7,61	0,019	77	75,87	15,17	87,3	52,36
Sub-bacia 5	8,50	0	7,29	0,028	76	80,21	16,04	72,78	43,67
Sub-bacia 6	28,76	0	15,65	0,018	74	89,24	17,85	155,28	93,16
Sub-bacia 7	8,66	11,45	7,47	0,016	74	89,24	17,85	91,98	55,19
Bacia concentrada	90,81	1,09	36,71	0,009	73	92,9012	18,58	391,02	234,60

Fonte: O Autor (2024).

5.2 CALIBRAÇÃO DOS MODELOS HIDROLÓGICOS

Este item expõe os resultados obtidos na calibração dos modelos nas diferentes ferramentas apresentadas neste estudo.

5.2.1 Eventos analisados

Os eventos de calibração e validação foram selecionados ao analisar os picos de vazão da série histórica da Estação Fluviométrica Moreno. Na Tabela 28 é apresentado o nome do evento, o período analisado e a vazão máxima observada para os modelos de discretização temporal sub-diária.

Tabela 28 - Eventos analisados nos modelos sub-diários.

Evento	Data inicial	Data final	Vazão de pico (m³/s)
Julho/2015	03/07/2015	06/07/2015	65,93
Julho/2017	18/07/2017	24/07/2017	65,42
Abril/2018	21/04/2018	25/04/2018	19,80
Junho/2019	12/06/2019	15/06/2019	31,74
Maio/2021	13/05/2021	16/05/2021	41,45
Maio/2022	27/05/2022	29/05/2022	114,63

Fonte: O Autor (2024).

Na Tabela 29 são apresentados os intervalos alterados. O evento Julho/2015 não será avaliado nos modelos NCRRT devido a necessidade de pelo menos um ano para aquecimento da rotina de cálculo

Tabela 29 - Eventos analisados nos modelos diários.

Evento	Data inicial	Data final
Julho/2015	01/07/2015	31/07/2015
Julho/2017	01/07/2017	31/07/2017
Abril/2018	01/04/2018	30/04/2018
Junho/2019	01/06/2019	30/06/2019
2021	01/01/2021	31/12/2021
Maio/2021	01/05/2021	31/05/2021
Maio/2022	01/05/2021	31/05/2021
Outono – Inverno/ 2022	01/04/2022	31/08/2022

Fonte: O Autor (2024).

5.2.2 Calibração do modelo CAWM Diário

Este item apresenta os resultados da calibração do modelo chuva-vazão diário desenvolvido no CAWM. A aquisição dos dados de caracterização física da bacia foi obtida por meio de técnicas de geoprocessamento e seus valores estão presentes na Tabela 30

Tabela 30 - Parâmetros de entrada dos modelos CAWM.

Parâmetro	Valor
Área da bacia (km ²)	90,81
Perímetro da Bacia (km)	98,09
Comprimento total da drenagem (m)	106.680,82
Declividade equivalente dos rios (m/m)	0,002
Largura equivalente da seção dos rios (m)	2
Coefficiente de rugosidade de Manning	0,03
Intervalo de tempo (s)	86.400
Capacidade de armazenamento percolação profunda - Gmax	4.000
Coefficiente do expoente do escoamento na calha - b	1,666667
Capacidade de armazenamento no solo - S – SUBmax	93,95

Fonte: O Autor (2024).

O modelo foi desenvolvido para representar a sub-bacia da estação Moreno, adotou-se um passo de tempo diário. Portanto, foi definido o período de calibração entre os dias 01/04/2022 e 31/08/2022 (152 dias), a fim de representar todo os picos de vazões durante os eventos de cheia do ano de 2022.

Os parâmetros obtidos na otimização estão presentes na Tabela 31.

Tabela 31 - Parâmetros calibrados no modelo CAWM V Diário.

PARÂMETROS CALIBRADOS CAWM V					
K_s	K_L	K	α	β	p
0,006203	-0,398593	0,055897	1,85	2,483358	1,2

Fonte: O Autor (2024).

Sousa (2022) calibrou o CAWM V em diversas bacias úmidas do leste da Região Nordeste, criando um acervo de parâmetros para diversas estações fluviométricas. O posto fluviométrico Vila Araripe (Código 39085300) localizada no Grupo de Rios Litorâneos (GL-1) com área de drenagem de 215 km² e semelhanças físicas e climáticas com a área de estudo. Os parâmetros calibrados possuem a mesma ordem de grandeza dos valores da Tabela 31.

De acordo com Cirilo *et al.* (2020), a versão IV foi desenvolvida para bacias de rios temporários, caracterizadas por solos rasos de baixa capacidade de acumulação, que resultou em um modelo com foco da quantificação do escoamento superficial, sem considerar os processos subterrâneos. Ao recalibrar o CAWM desenvolvido para a sub-bacia Moreno para a versão de rios temporários se obtém os seguintes parâmetros, Tabela 32.

Tabela 32 - Parâmetros calibrados no modelo CAWM IV.

PARÂMETROS CALIBRADOS CAWM IV					
K_s	K_L	K	α	β	p
0	0,05218	0,04291	0,44606	2	1,31771

Fonte: O Autor (2024).

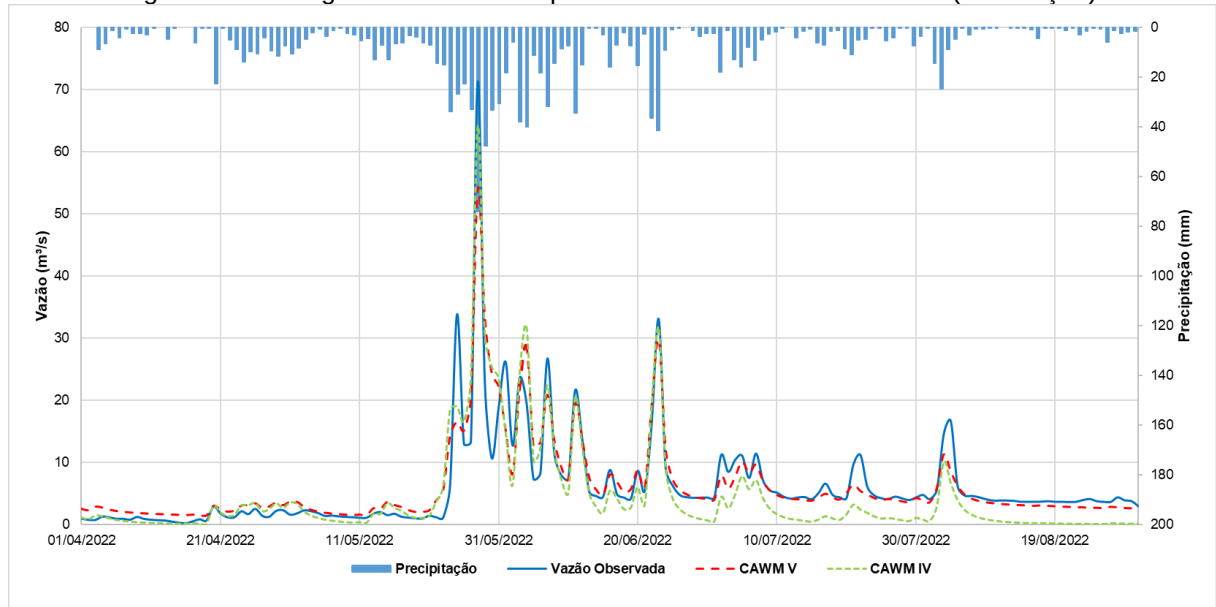
Ao comparar os parâmetros obtidos na Tabela 31 e na Tabela 32, a desconconsideração dos processos subterrâneos resulta no valor nulo do K_s (Cirilo *et al.*, 2020). Enquanto o coeficiente de perdas passa a ser positivo no CAWM IV, que representa as perdas durante o escoamento superficial, na versão para rios perenes (CAWM V), o valor negativo pode representar que há grande contribuição das águas subterrâneas no escoamento do Rio Jaboatão neste trecho. Houve grande diferença no valor do α , que representa a evaporação, seu valor padrão é de 1,4, enquanto no CAWM IV o valor 0,44 representa a subestimação, no CAWM V o valor de 1,85 indica a maior contribuição das perdas por evaporação no sistema.

Dadas as diferenças entre os parâmetros devido a consideração dos processos subterrâneos, é possível observar vários comportamentos ao longo do período de calibração Figura 45. Entre o início do mês abril e metade de maio de 2022 não houve eventos de precipitação com grandes acumulados, o modelo CAWM IV ajustou-se bem às baixas vazões, enquanto no CAWM V o ajuste tendeu a superestimar os valores.

No cenário de elevadas vazões, entre o final de maio e junho 2022, ambos os modelos subestimaram a vazão de pico, enquanto as observações registraram 71,25 m³/s, o CAWM IV calculou 64,23 m³/s e o CAWM V 54,04 m³/s. Ambos os modelos apresentaram bom ajuste, representando bem as variações de vazão ao longo do período.

Contudo, nos meses julho e agosto de 2022, a consideração dos processos subterrâneos do CAWM V criaram uma memória hidrológica dos eventos que antecederam este período. Mesmo com eventos de pouca precipitação, foi observado uma constância da vazão, enquanto o CAWM IV apresentou valores próximos de 0 nesse cenário.

Figura 45 - Hidrograma de cheia do período 01/04/2022 a 31/08/2022 (Calibração).



Fonte: O Autor (2024).

Os resultados no período de maio e junho de 2022, foi observado boas simulações em ambos os modelos. Contudo, observa-se um desempenho frágil no CAWM IV no período de julho, visto que a ausência do reservatório subterrâneo contribui com a redução do volume escoado.

Os indicadores de performance estatística foram avaliados com as recomendações propostas por Moriasi *et al.* (2007). As métricas estatísticas da calibração estão dispostas na Tabela 33.

Tabela 33 - Indicadores de performance estatística do modelo CAWM Diário.

MÉTRICAS ESTATÍSTICAS DA CALIBRAÇÃO DOS MODELOS CAWM				
Modelo	RSR	NSE	PBIAS	R ²
CAWM IV	0,49	0,76	-25,11%	0,81
CAWM V	0,41	0,83	3,15%	0,83

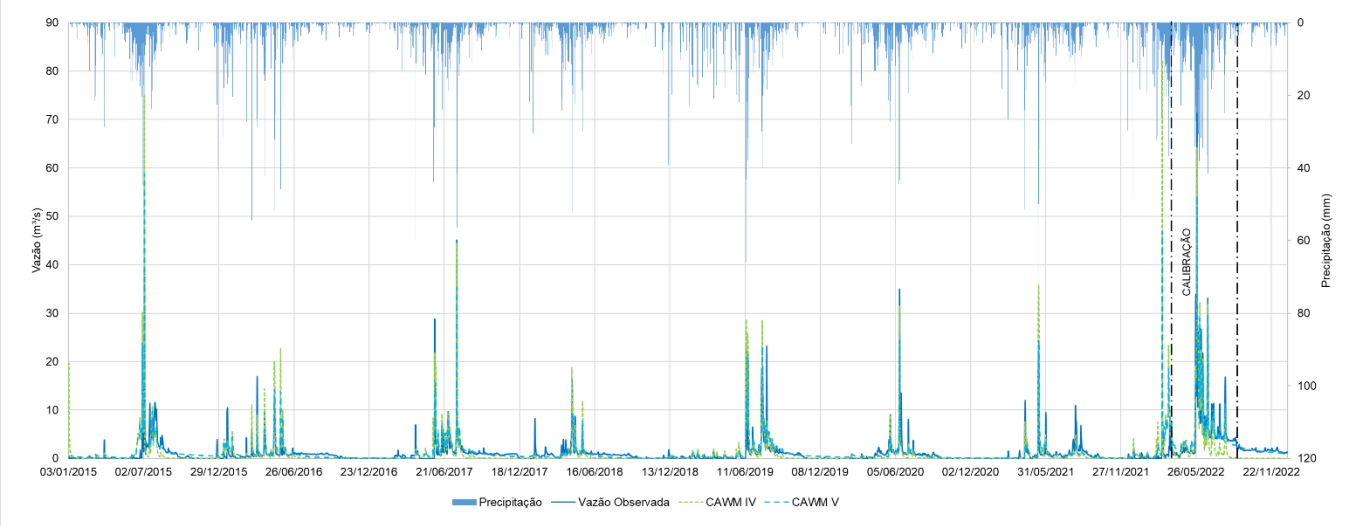
Fonte: O Autor (2024).

Apesar de não ser adequado para bacias úmidas, o desempenho do NSE do CAWM IV foi classificado como Muito Bom assim como na versão para rios perenes, Tabela 33. Contudo, o CAWM V apresentou melhor ajuste estatístico na área de estudo.

A Figura 46 representa graficamente a série histórica de precipitação média da bacia junto com a comparação entre a vazão observada e simulada entre ambas as versões, é evidente que a consideração dos processos subterrâneos garante o melhor

ajuste em longos períodos. O balanço hídrico total e o desempenho estatístico global estão representados na Tabela 34 e na Tabela 35, respectivamente.

Figura 46 - Hidrograma de vazão no período de 01/01/2015 e 31/12/2022 no Modelo CAWM Diário.



Fonte: O Autor (2024).

Tabela 34 - Balanço hídrico da sub-bacia Moreno entre os anos de 2015 e 2022 no Modelo CAWM Diário.

BALANÇO HÍDRICO GLOBAL		
	CAWM V	CAWM IV
EVAPORAÇÃO POTENCIAL (mm)	14.512,98	14.512,98
EVAPORAÇÃO REAL MÁXIMA (mm)	6.174,41	6.174,41
LÂMINA Q OBS (mm)	3.412,64	3.412,64
VOLUME PRECIPITADO (mm)	9.587,05	9.587,05
EVAP REAL (mm)	6.955,43	6.330,52
ESCOADO (mm)	3.844,59	2.963,10
Armazenamento SUPERFICIAL INÍCIO (mm)	2,29	2,00
Armazenamento SUPERFICIAL FINAL (mm)	4,52	0,25
PERDAS (mm)	-1.239,04	370,98
BALANÇO (mm)	0,02	-40

Fonte: O Autor (2024).

O balanço hídrico da versão V ficou próximo de zero, quanto a versão IV o valor negativo indica um desequilíbrio e maiores perdas.

Tabela 35 - Métricas estatísticas da simulação global do Modelo CAWM Diário.

MÉTRICAS ESTATÍSTICAS DA SIMULAÇÃO GLOBAL DOS MODELOS CAWM				
Modelo	RSR	NSE	PBIAS	R ²
CAWM IV	0,79	0,37	-13,17%	0,60
CAWM V	0,58	0,66	12,66%	0,69

Fonte: O Autor (2024).

As métricas estatísticas da simulação global indicam a superioridade do CAWM V para bacias úmidas, visto que o ajuste estatístico foi considerado Satisfatório enquanto a versão IV foi Insatisfatória.

O modelo CAWM IV não é indicado para representar o escoamento superficial em bacias úmidas a longo prazo, visto que não serão consideradas as contribuições dos processos subterrâneos. Portanto, neste estudo essa versão não será comparada com o CAWM V durante a etapa de validação.

5.2.2.1 Validação do modelo CAWM V Diário

Este item apresenta os resultados da validação do modelo desenvolvido no CAWM. O desempenho estatístico foi avaliado conforme os critérios de Moriasi *et al.* (2007). Os resultados da calibração estão dispostos na Tabela 36.

Tabela 36 - Desempenho estatístico da validação do modelo CAWM Diário.

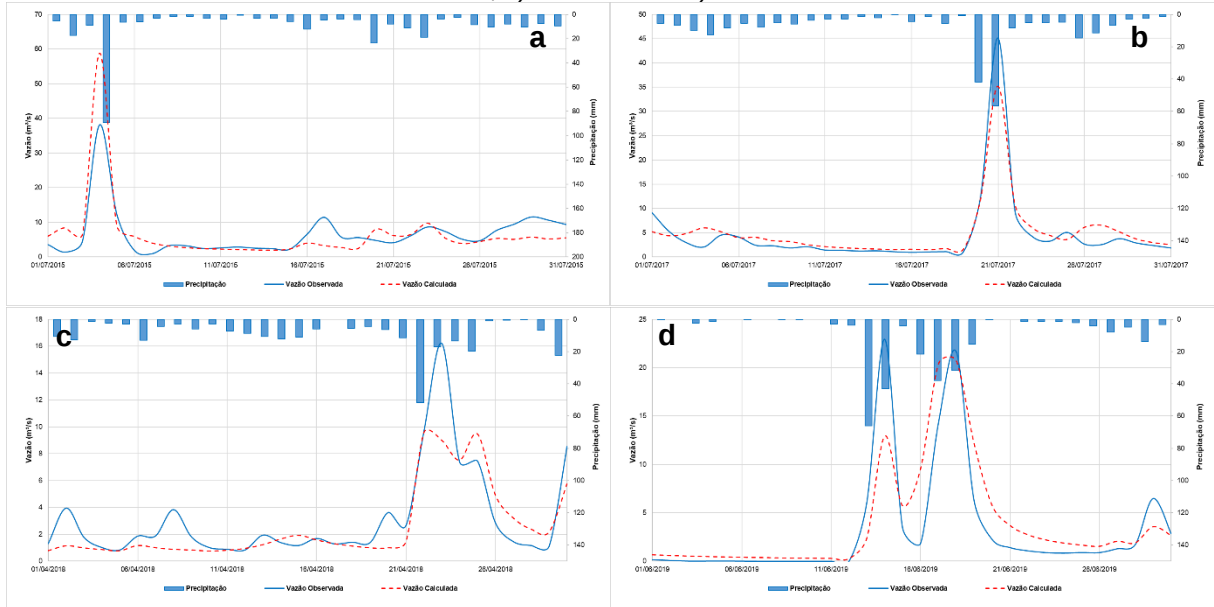
Evento	RSR		NSE		PBIAS	
Julho/2015	0,74	Insuficiente	0,46	Insuficiente	-0,93%	Muito Bom
Julho/2017	0,31	Muito Bom	0,90	Muito Bom	9,62%	Muito Bom
Abril/2018	0,55	Bom	0,70	Bom	-17,15%	Satisfatório
Junho/2019	0,53	Bom	0,72	Bom	21,75%	Satisfatório
2021	0,80	Insuficiente	0,35	Insuficiente	-8,58	Muito Bom
Maio/2021	0,85	Insuficiente	0,28	Insuficiente	32,94	Insuficiente
MÉDIA	0,63	Satisfatório	0,57	Satisfatório	4,08	Muito Bom

Fonte: O Autor (2024).

O desempenho estatístico foi variado em todos os eventos, sendo Insatisfatório em Julho/2015, Maio/2021 e 2021, Satisfatório em Junho/2019, Bom em Abril/2018 e Muito Bom em Julho/2017. Os eventos Julho/2015, Julho/2017, Abril/2018 e Junho/2019 estão agrupados nas Figura 47a, Figura 47b, Figura 47c e Figura 47d,

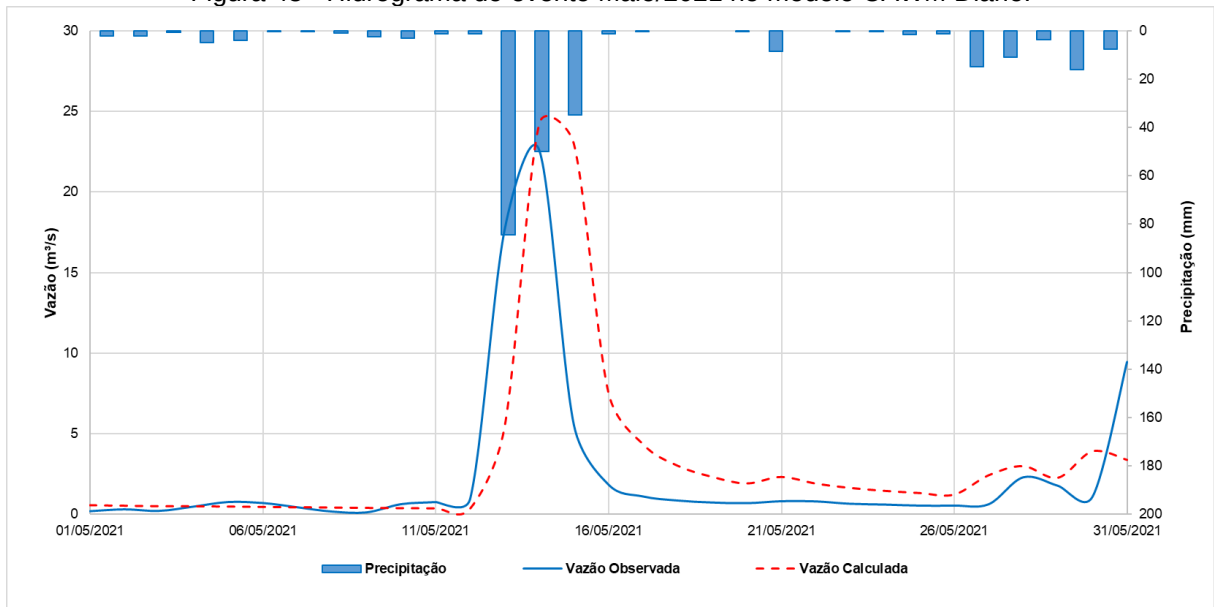
respectivamente. Os hidrogramas dos eventos Maio/2021 e 2021 estão ilustrados nas Figura 48 e Figura 49.

Figura 47 - Hidrograma de cheia para os eventos de validação o CAWM Diário: a) Julho/2015, b) Julho/2017, c) Abril/2018 e d) Junho/2019.



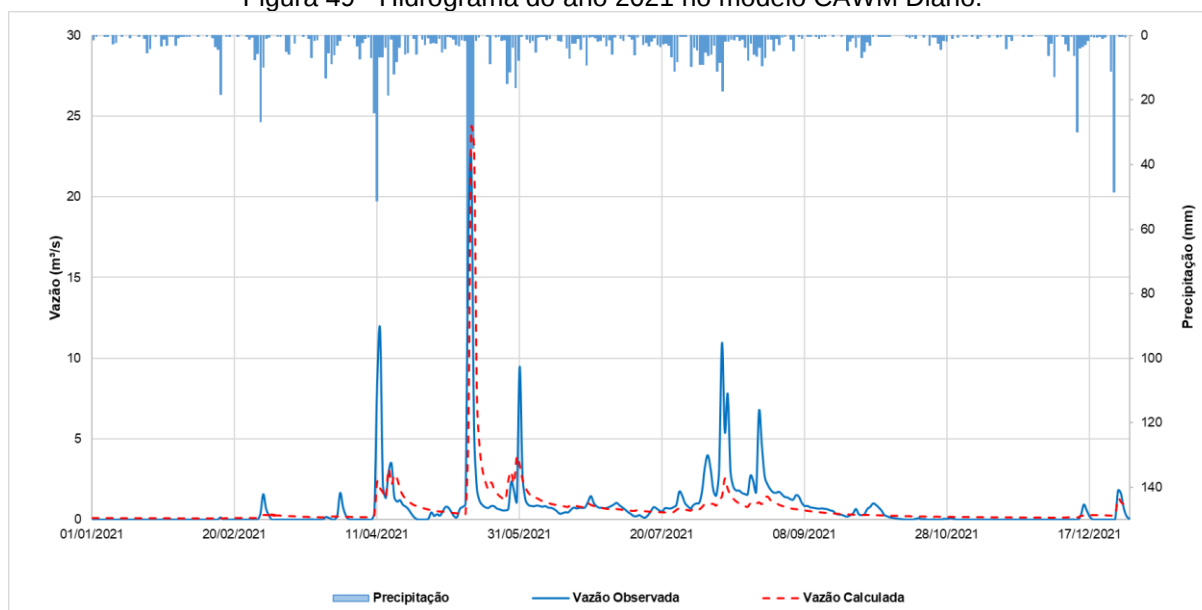
Fonte: O Autor (2024).

Figura 48 - Hidrograma do evento Maio/2021 no modelo CAWM Diário.



Fonte: O Autor (2024).

Figura 49 - Hidrograma do ano 2021 no modelo CAWM Diário.



Fonte: O Autor (2024).

O evento Julho/2017 foi o melhor cenário simulado no CAWM Diário, no qual a vazão de pico foi subestimada, mas as vazões médias foram representadas com fidelidade. Os eventos Maio/2021 e 2021 foram os piores cenários analisados.

Apesar do desempenho “Insatisfatório” nos cenários Julho/2015, Maio/2021 e 2021, o modelo chuva-vazão diário apresentou desempenho médio global “Satisfatório”, além do ótimo desempenho de calibração (Muito Bom).

Ferraz (2019) projetou 6 reservatórios ao longo da Bacia Hidrográfica do Rio Sirinhaém, localizado na zona da mata do estado de Pernambuco. Tal estudo calibrou o CAWM V em áreas de drenagem entre 74 e 712 km² em períodos de anos completos (2000, 2001, 2004, 2010, 2011 e 2017), com NSE médio de 0,65. Ao comparar os coeficientes calibrados por Ferraz (2019) e os coeficientes obtidos neste estudo é possível observar que valores do coeficiente de permeabilidade do solo, K_s , foi de 0,006 que é bastante próximo do valor estimado neste estudo.

Portanto, é possível afirmar que a simulação diária aplicada no CAWM V é representativa com desempenho estatístico “Satisfatório”.

5.2.3 Calibração dos modelos do NCRRT

Este item apresenta os resultados da calibração dos modelos hidrológicos GR4J, GR5J, GR6J, HYMOD e HBV desenvolvidos na ferramenta NCRRT. Semelhante ao CAWM, este *software* realiza otimizações com função objetivo de maximizar o NSE ao alterar as variáveis durante o processo de calibração.

Após diversos testes entre os eventos apresentados, o período 01/01/2021 a 31/12/2021 apresentou o melhor ajuste estatístico durante a fase de validação, nos modelos GR4J, GR5J, GR6J e HYMOD. Contudo, para o HBV foi adotado o intervalo 01/04/2022 a 31/07/2022.

Inicialmente, o programa fornece uma primeira estimativa dos parâmetros calibrados, após isso, os seus valores foram alterados manualmente até encontrar o melhor ajuste estatístico.

Os parâmetros calibrados dos modelos presentes no NCRRT estão dispostos na Tabela 37, Tabela 38 e Tabela 39.

Tabela 37 - Parâmetros calibrados dos modelos GR4J, GR5J e GR6J.

Modelo	S1_max	Exch	S2_max	UHB	Exch_T	S3_max
GR4J	316,059	-7,234	61,934	1,141	-	-
GR5J	407,292	-5,772	49,838	1,145	0,426	-
GR6J	299,694	-4,326	500	1,262	0,26	0,762

Fonte: O Autor (2024).

Observa-se que os parâmetros em comum possuem mesma ordem de grandeza e proximidade dos valores. Contudo, o parâmetro S2_max do GR6J, que equivale a capacidade do reservatório de propagação de vazão, obteve valor de 500 mm que equivale aproximadamente 10 vezes maior do que nos demais modelos.

Assim como no estudo de Melo *et al.* (2021), que avaliou uma sub-bacia do Rio Una em Pernambuco, foram obtidos valores negativos de Exch, assim como neste estudo. Este fato ocorre devido a existência de perdas moderadas no sistema.

Tabela 38 - Parâmetros calibrados do modelo HYMOD.

Modelo	C_max	Bexp	Alpha	Rs	Rq
HYMOD	499,997	0,19	0,404	0,001	0,727

Fonte: O Autor (2024).

Tabela 39 - Parâmetros calibrados do modelo HBV

Modelo	PWP	FC	Beta	L	K0	K1	K2	Kperc	C
HBV	90,017	199,984	1,266	4,997	0,2	0,1	0,01	0,05	0,04

Fonte: O Autor (2024).

Os indicadores de performance estatística foram avaliados com as recomendações propostas por Moriasi *et al.* (2007). As métricas estatísticas da calibração e sua classificação estão dispostas na Tabela 40.

Tabela 40 - Indicadores de performance estatística da calibração dos modelos disponíveis no NCRRT.

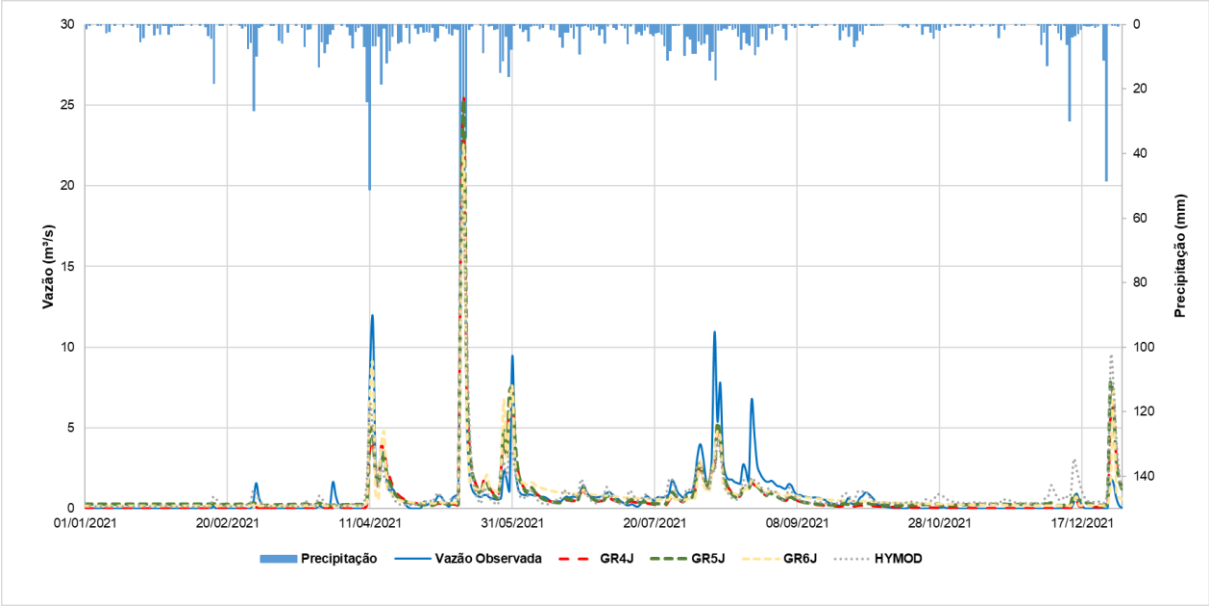
Modelo	NSE		RMSE (m³/s)		PBIAS	
GR4J	0,748	Bom	1,057	-17,50%	Satisfatório	
GR5J	0,746	Bom	1,062	-0,90%	Muito Bom	
GR6J	0,814	Muito Bom	0,909	-0,80%	Muito Bom	
HYMOD	0,683	Bom	1,186	5,50%	Muito Bom	
HBV	0,745	Bom	4,272	6,90%	Muito Bom	

Fonte: O Autor (2024).

O GR6J teve o melhor desempenho durante a calibração, destacando-se por seu menor RMSE (Erro Quadrático Médio) que indica um melhor ajuste do modelo aos dados.

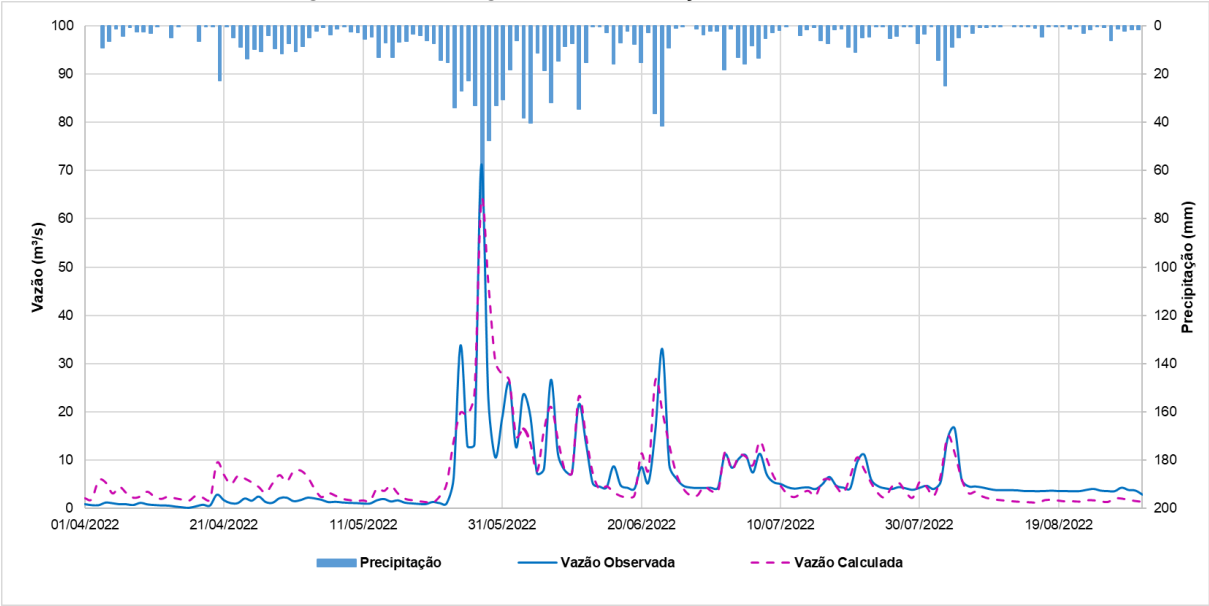
É evidente que o GR6J teve o melhor desempenho, seu ajuste é considerado como “Muito Bom”, em seguida o GR5J obteve parâmetros classificados entre “Bom” e “Muito Bom”, com performance melhor do que o GR4J e RMSE ligeiramente maior. Em relação ao HYMOD o GR4J obteve valores de NSE maiores e menor erro quadrático, contudo o Pbias teve pior classificação. Na Figura 50 são apresentados os hidrogramas de calibração dos modelos citados anteriormente. O HBV (Figura 51) teve desempenho do NSE e Pbias semelhante ao GR4J, contudo esse modelo teve o pior desempenho de RMSE em relação aos demais.

Figura 50 - Hidrograma de calibração dos modelos GR4J, GR5J, GR6J e HYMOD.



Fonte: O Autor (2024).

Figura 51 - Hidrograma de calibração do modelo HBV.



Fonte: O Autor (2024).

5.2.3.1 Validação dos modelos do NCRRT

Este item apresenta os resultados da calibração dos modelos GR4J, GR5J, GR6J, HYMOD e HBV desenvolvidos na ferramenta NCRRT. O desempenho estatístico e sua classificação estão dispostos na Tabela 41.

Tabela 41 - Indicadores de performance estatística da validação dos modelos disponíveis no NCRRT.

Evento	Modelo	RMSE (m³/s)	NSE		PBIAS	
Julho/2017	GR4J	4,346	0,722	Bom	-9,4%	Muito Bom
	GR5J	3,962	0,769	Muito Bom	-4,2%	Muito Bom
	GR6J	4,93	0,642	Satisfatório	-5,7%	Muito Bom
	HYMOD	4,955	0,639	Satisfatório	-4,8%	Muito Bom
	HBV	5,493	0,556	Satisfatório	49%	Insatisfatório
Abril/2018	GR4J	1,989	0,688	Bom	-19%	Satisfatório
	GR5J	1,738	0,762	Muito Bom	-22,7%	Satisfatório
	GR6J	1,953	0,7	Bom	-36,7%	Insatisfatório
	HYMOD	2,605	0,465	Insatisfatório	-4,3%	Muito Bom
	HBV	4,246	-0,421	Insatisfatório	83,6%	Insatisfatório
Junho/2019	GR4J	2,995	0,765	Muito Bom	-5,6%	Muito Bom
	GR5J	3,047	0,757	Muito Bom	-11,2%	Bom
	GR6J	2,754	0,801	Muito Bom	-14,7%	Bom
	HYMOD	4,347	0,505	Satisfatório	-37,1%	Insatisfatório
	HBV	5,114	0,315	Insatisfatório	87,1%	Insatisfatório
Outono-Inverno-2022	GR4J	4,405	0,728	Bom	-33,8%	Insatisfatório
	GR5J	4,236	0,749	Bom	-26,8%	Insatisfatório
	GR6J	4,528	0,713	Bom	-21,8%	Satisfatório
	HYMOD	5,259	0,613	Satisfatório	-31,5%	Insatisfatório
	HBV	-	-	-	-	-
Global	GR4J	3,205	0,062	Insatisfatório	-31,1%	Insatisfatório
	GR5J	3,114	0,115	Insatisfatório	-17,7%	Satisfatório
	GR6J	2,42	0,466	Insatisfatório	-15,9%	Satisfatório
	HYMOD	3,055	0,152	Insatisfatório	10,6%	Bom
	HBV	3,154	0,092	Insatisfatório	51,4%	Insatisfatório

Fonte: O Autor (2024).

De forma geral o HBV apresentou desempenho Insatisfatório em todos os eventos, sendo o pior modelo avaliado nesta comparação.

Ávila *et al.* (2022) validou 5 modelos hidrológicos (GR4J, HYMOD, HBV, SMAP e MGB-IPH) para seis hidroelétricas localizadas ao longo do Rio Tocantins (Brasil). Este estudo avaliou uma área de drenagem de até 285.778 km² com vazão média de até 2.750 m³/s. O modelo HBV e HYMOD apresentaram métricas estatísticas superiores ao GR4J durante a fase de calibração. Os autores recomendaram o uso de diferentes modelos para avaliar o escoamento devido a limitação de modelos mais simplificados como o GR4J. Contudo, ao aplicar modelos complexos na sub-bacia Moreno (área de drenagem de 90,81 km² e vazão média de 1,23m³/s) as métricas estatísticas indicaram um péssimo ajuste. A dificuldade de calibrar os parâmetros do HYMOD e do HBV, garantiu a vantagem para os modelos GR que possuem número reduzido de coeficientes.

Durante a fase de calibração, o modelo GR6J representou melhor o período analisado, seguido pelo GR5J que obteve resultados semelhantes e o GR4J que teve o pior desempenho dos 3. De forma geral, todos os modelos “*Génie Rural*” obtiveram desempenho médio Satisfatório durante a fase de validação, destacando-se a performance estatística próxima entre o GR5J e o GR6J, no qual o segundo foi ligeiramente melhor.

Ao analisar eventos de até 1 mês de duração, o NSE para o GR5J é classificado como Muito Bom. Contudo, ao analisar períodos maiores, o GR6J desempenha melhor performance.

Os hidrogramas de validação estão dispostos na Figura 52 e a série histórica dos modelos na Figura 53.

Figura 52 – Comparação entre os hidrogramas de validação nos diferentes modelos do NCRRT: a) Julho/2017, b) Abril/2018, c) Junho/2019 e d) 2022.

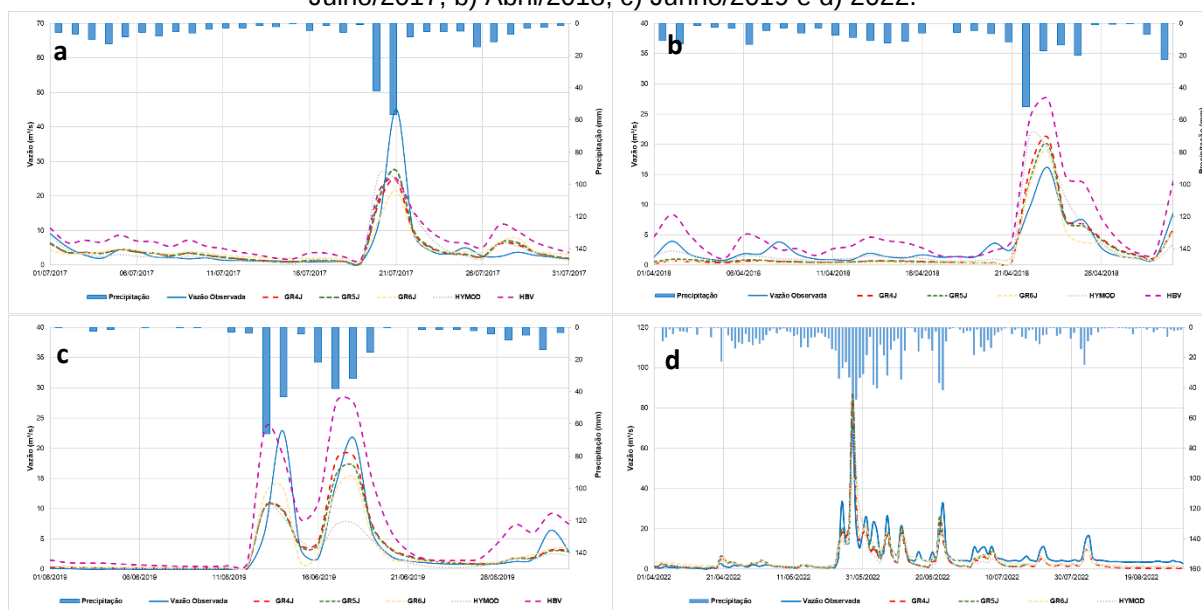
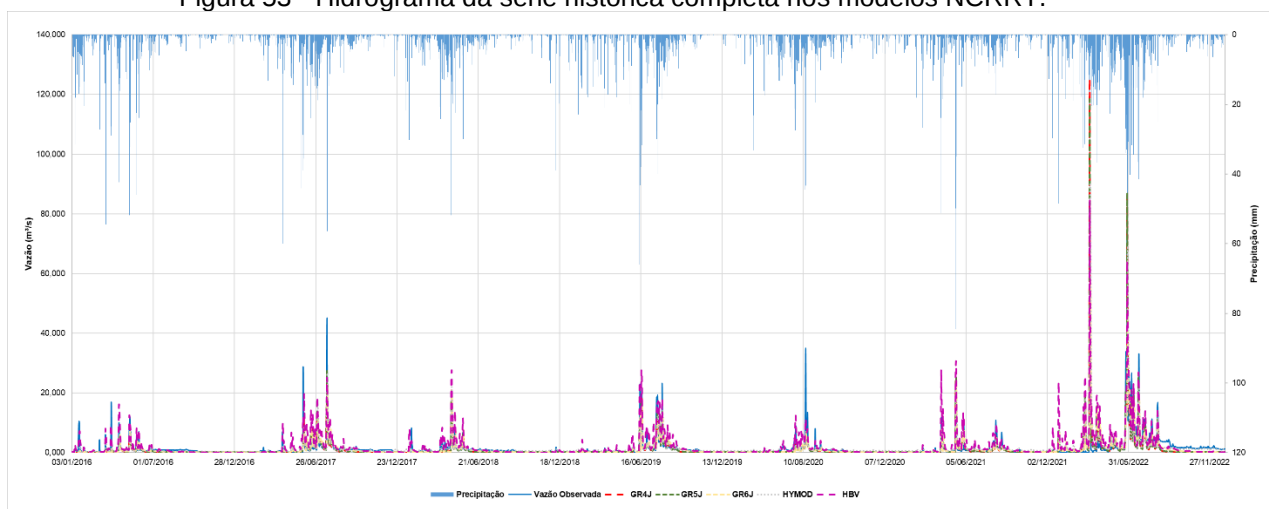


Figura 53 - Hidrograma da série histórica completa nos modelos NCRRT.



Fonte: O Autor (2024).

As análises de validação realizadas permitem afirmar que os modelos HBV e HYMOD não são representativos para a Sub-bacia da estação Moreno. Enquanto todos os modelos GR desempenharam melhor ajuste estatístico aos dados fornecidos, podendo ser utilizados para representar a vazão do Rio Jaboatão na área de estudo. Destaca-se o desempenho do GR5J durante a fase de validação, no qual superou o GR6J que obteve calibração ligeiramente melhor.

5.2.4 Comparação de desempenho entre os modelos diários GR e CAWM V

Os modelos GR e CAWM V foram comparados nos mesmos cenários, o desempenho estatístico está presente na Tabela 42. Ao calcular a média das métricas estatísticas em diferentes modelos com durações variadas, observa-se que o CAWM superou os modelos GR.

Tabela 42 - Indicadores de performance estatística dos modelos diários avaliados nos mesmos cenários.

Evento	Modelo	NSE	PBIAS
Julho/2017	GR4J	0,722	-9,4%
	GR5J	0,769	-4,2%
	GR6J	0,642	-5,7%
	CAWM	0,90	9,62%
Abril/2018	GR4J	0,688	-19%
	GR5J	0,762	-22,7%
	GR6J	0,7	-36,7%
	CAWM	0,70	-17,15%
Junho/2019	GR4J	0,765	-5,6%
	GR5J	0,757	-11,2%
	GR6J	0,801	-14,7%
	CAWM	0,72	21,75%
Calibração GR	GR4J	0,728	-33,8%
	GR5J	0,749	-26,8%
	GR6J	0,713	-21,8%
	CAWM	0,83-	3,15%
Calibração CAWM V	GR4J	0,728	-33,8%
	GR5J	0,749	-26,8%
	GR6J	0,713	-21,8%
	CAWM	0,83	3,15%
Global	GR4J	0,062	-31,1%
	GR5J	0,115	-17,7%
	GR6J	0,466	-15,9%
	CAWM	0,66	12,66%
Média	GR4J	0,6155	-22,12%
	GR5J	0,650167	-18,23%
	GR6J	0,6725	-19,43%
	CAWM	0,745	5,53%

Fonte: O Autor (2024).

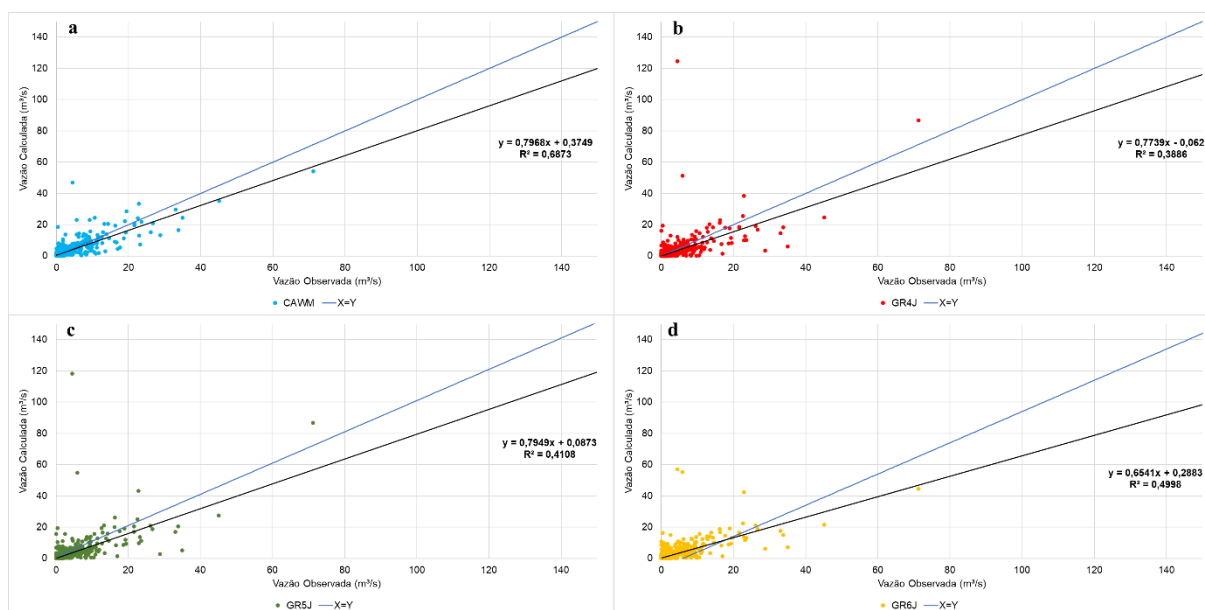
Flores *et al.* (2021) investigaram o desempenho dos modelos GR em quatro bacias florestais com áreas inferiores a 40 hectares. Os resultados demonstraram que, para baixas vazões, modelos mais complexos, como o GR6J, superaram as versões mais simples, como o GR4J. A adição dos parâmetros Exch_T e S3_max nos modelos mais complexos possibilita a representação dos processos subterrâneos de infiltração e recarga dos aquíferos. De modo geral, essa mesma lógica aplica-se ao modelo CAWM, onde a inclusão do parâmetro K_L permite a representação desses processos subterrâneos.

De forma similar, Julander e Clayton (2024) avaliaram a eficiência dos modelos GR na estimativa da evapotranspiração potencial em cinco bacias do Rio Senegal, localizado no oeste da África. Os modelos GR4J e GR5J mostraram-se mais adequados para simulações de altas vazões, enquanto o GR6J apresentou melhor desempenho para baixas vazões, devido à sua maior complexidade. Nesse estudo, o GR6J superou os outros modelos GR apenas em cenários de longa duração e com menores amplitudes de picos de vazão, como observado no Evento de Junho de 2019 e na série histórica global. No que tange aos modelos GR, o CAWM V não apresentou diferenças significativas entre os diversos cenários de vazão, sendo considerado o modelo mais adequado para simulações de longo prazo.

Vasconcelos (2020) comparou a eficácia do CAWM com o GR4J em 4 bacias do estado de Pernambuco, dentre elas, a bacia do Rio Sirinhaém, que possui semelhanças climáticas e morfológicas em relação a área de estudo. Ao comparar o desempenho e 22 eventos de validação com durações variadas, o CAWM superou o GR4J em 61% dos cenários. De maneira semelhante, neste estudo foram obtidos resultados semelhantes.

Ao comparar as vazões observadas com as vazões calculadas é possível observar a dispersão dos valores estimados ao longo da amplitude das observações. Este método foi empregado no estudo de Mo *et al.* (2024) quanto mais próximo de 1 o valor do coeficiente de determinação e de inclinação da reta, melhor o ajuste. Ao aplicar a este método ao longo e toda a série histórica (Figura 54) é possível observar a tendência de subestimação das vazões em todos os modelos.

Figura 54 - Comparação entre as vazões observadas e calculadas ao longo da série histórica: a) modelo CAWM, b) modelo GR4J, c) modelo GR5J, e d) modelo GR6J.



Fonte: O Autor (2024).

Ao comparar os gráficos da Figura 54 com as médias da Tabela 42 é possível ranquear o desempenho dos modelos. O CAWM V superou o GR tanto na avaliação proposta por Moriasi *et al.* (2007) quanto na análise gráfica, a inclinação da reta foi o mais próximo de 1, enquanto o R^2 foi o maior observado. Dentre os modelos GR, o GR6J superou as demais versões, seguido pelo GR5J e GR4J.

5.2.5 Calibração dos modelos HEC-HMS

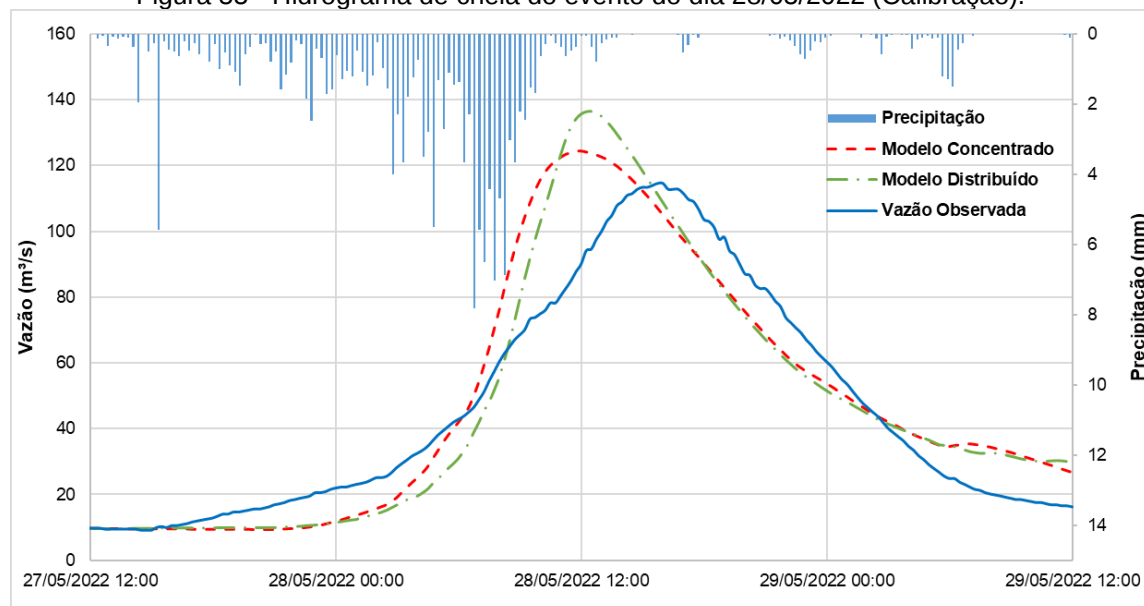
Este item apresenta os resultados da calibração dos modelos concentrado e distribuído por sub-bacias do HEC-HMS. Os modelos foram calibrados com base nos parâmetros dispostos na Tabela 27.

O evento de calibração (Evento Maio/2022) foi selecionado devido à sua grande intensidade e seu impacto na Região Metropolitana do Recife. Na Figura 55 é apresentado o hidrograma de cheia com passo de tempo de 15 minutos. Observa-se precipitação de grande intensidade no dia 28/05/2022, com picos de intensidade de precipitação ultrapassando 22,39 mm/hora.

A vazão máxima observada de 114,60 m³/s foi registrada às 15:45 do dia 28/05/2022. O Modelo Concentrado (MC) teve como pico o valor de 124,50 m³/s às 12:00 no mesmo dia, enquanto o Modelo Distribuído por Sub-bacias (MD) apresentou

136,4 m³/s as 12:30. É evidente que os picos de vazão foram superestimados em ambos os casos, com erro médio de aproximadamente 8,63% para o MC e 19,02% no MD.

Figura 55 - Hidrograma de cheia do evento do dia 28/05/2022 (Calibração).



Fonte: O Autor (2024).

O desempenho estatístico das simulações foi avaliado por meio do critério de apresentado por Moriasi *et al.* (2007), conforme a Tabela 8, no qual os valores de NSE, RSR e Pbias foram classificados como Muito bom, Bom, Satisfatório e Insuficiente. Chaves (2023) pontuou em seu estudo que o NSE é o critério estatístico mais importante para avaliar o qual preciso é o modelo hidrológico avaliado, visto que este parâmetro é fortemente influenciado pelos erros nas vazões máximas.

Na Tabela 45 são apresentados os indicadores de performance estatística encontrados, ambos os modelos apresentaram ajuste classificado como Muito Bom para todos os critérios. O MC se destaca por seu maior valor de 0,828 devido ao menor erro percentual em relação ao MD.

Tabela 43 - Performance estatística dos modelos distribuídos e concentrados do HEC-HMS.

Modelo	RSR	NSE	PBIAS
Concentrado	0,4	0,828	4,20%
Semi-distribuído	0,4	0,819	1,49%

Fonte: O Autor (2024).

Na Tabela 43 é apresentado o quantitativo geral de volumes do MC e MD para o evento de calibração. A Sub-bacia 7, com 11,45% de sua área impermeabilizada, apresentou a maior porcentagem volume escoado/precipitado, com 62,12%, que supera outras bacias com valores de CN próximos e/ou área total, como a Sub-bacia 5. Esse fato confirma os impactos da urbanização no escoamento superficial.

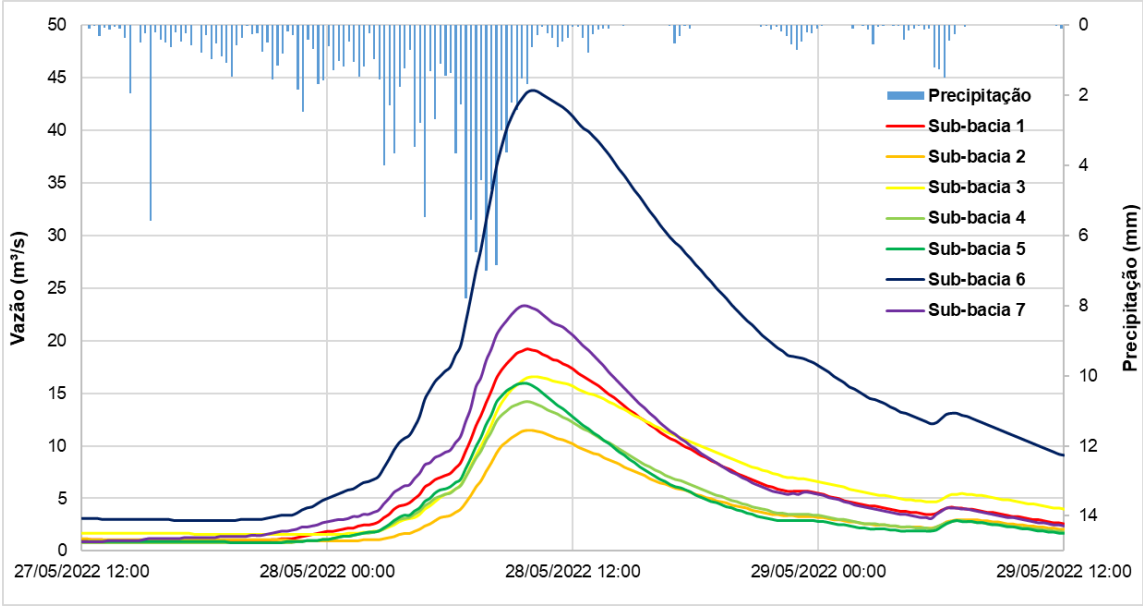
Tabela 44 - Volume precipitado, de perdas e escoado por sub-bacia.

Sub-bacia	Precipitação (1000m ³)	Volume de Perdas (1000m ³)	Volume Escoado (1000m ³)	Porcentagem escoada
Sub-bacia 1	1809,24	801,40	926,10	51,19%
Sub-bacia 2	1422,80	884,00	481,40	33,83%
Sub-bacia 3	2103,52	1.121,80	850,30	40,42%
Sub-bacia 4	1171,43	500,00	621,70	53,07%
Sub-bacia 5	1205,58	549,30	614,00	50,93%
Sub-bacia 6	4903,36	2.120,20	2.456,80	50,10%
Sub-bacia 7	1757,56	595,40	1.091,8	62,12%
Bacia concentrada	14.373,50	6.730,10	7.050,30	49,05%

Fonte: O Autor (2024).

Ao comparar os hidrogramas de cheia de todas as sub-bacias (Figura 56), é evidente que a Sub-bacia 6 representa a maioria do fluxo na sub-bacia da estação Moreno, visto que sua área corresponde a 31,67% do total. Seguido pela Sub-bacia 6 que mesmo representando apenas 9,54% da área, o escoamento foi potencializado devido a sua maior taxa de impermeabilização.

Figura 56 - Hidrograma de cheia das sub-bacias no evento do dia 28/05/2022 (Calibração).



Fonte: O Autor (2024).

5.2.5.1 Validação dos modelos HEC-HMS

Este item apresenta os resultados da validação dos modelos desenvolvidos no HEC-HMS. Na Tabela 45 é comparado o desempenho da validação dos MC e MD nos diferentes eventos identificados na Tabela 28. Junto com a classificação dos indicadores estatísticos conforme o critério de Moriasi *et al.* (2007).

Tabela 45 - Desempenho estatístico da validação dos modelos HEC-HMS.

Evento	Modelo	RSR		NSE		PBIAS	
Julho/2015	Concentrado	0,3	Muito Bom	0,925	Muito Bom	-9,80	Muito Bom
	Semi-distribuído	0,3	Muito Bom	0,922	Muito Bom	-7,41	Muito Bom
Julho/2017	Concentrado	0,4	Muito Bom	0,823	Muito Bom	-24,15	Satisfatório
	Semi-distribuído	0,5	Muito Bom	0,769	Muito Bom	-26,37	Insuficiente
Abril/2018	Concentrado	0,6	Satisfatório	0,589	Satisfatório	14,34	Bom
	Semi-distribuído	0,8	Insuficiente	0,392	Insuficiente	24,24	Satisfatório
Junho/2019	Concentrado	0,4	Muito Bom	0,821	Muito Bom	17,13	Satisfatório
	Semi-distribuído	0,4	Muito Bom	0,843	Muito Bom	20,07	Satisfatório
Maio/2021	Concentrado	0,5	Muito Bom	0,748	Satisfatório	23,63	Satisfatório
	Semi-distribuído	0,5	Muito Bom	0,765	Muito Bom	22,70	Satisfatório
Média	Concentrado	0,44	Muito Bom	0,781	Muito Bom	4,23	Muito Bom
	Semi-distribuído	0,5	Muito Bom	0,738	Bom	6,65	Muito Bom

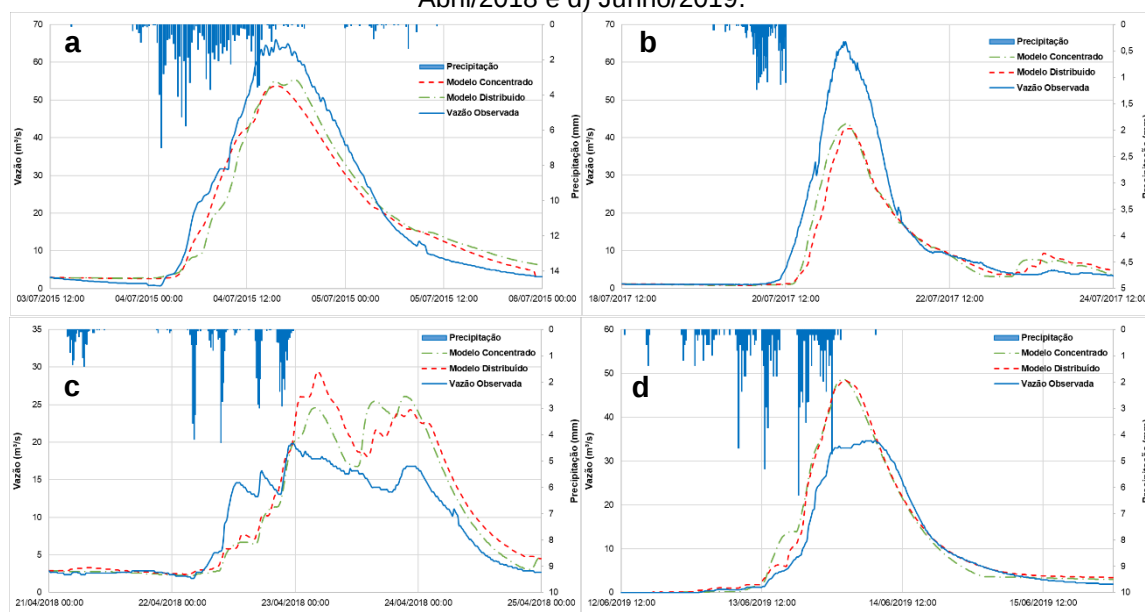
Fonte: O Autor (2024).

O desempenho das simulações do MC e do MD foi bastante próximo em cada comparação de evento. Ambos obtiveram o melhor cenário no evento Julho/2015, no qual os ajustes foram classificados como Muito Bom. Houve diferença na classe do Pbias para Julho/2017, o desempenho do MD foi insatisfatório e o MC satisfatório. Contudo, as demais métricas foram consideradas como Muito Bom.

O evento Abril/2018 foi o pior cenário para ambas as distribuições espaciais, enquanto o MC apresentou desempenho satisfatório, o ajuste do MD foi insatisfatório. Para Junho/2019 ambas simulações obtiveram ajuste semelhante. Por fim, o MD teve melhor classificação em comparação com o MC no evento Maio/2021. É evidente que ambos os modelos apresentam desempenho semelhante.

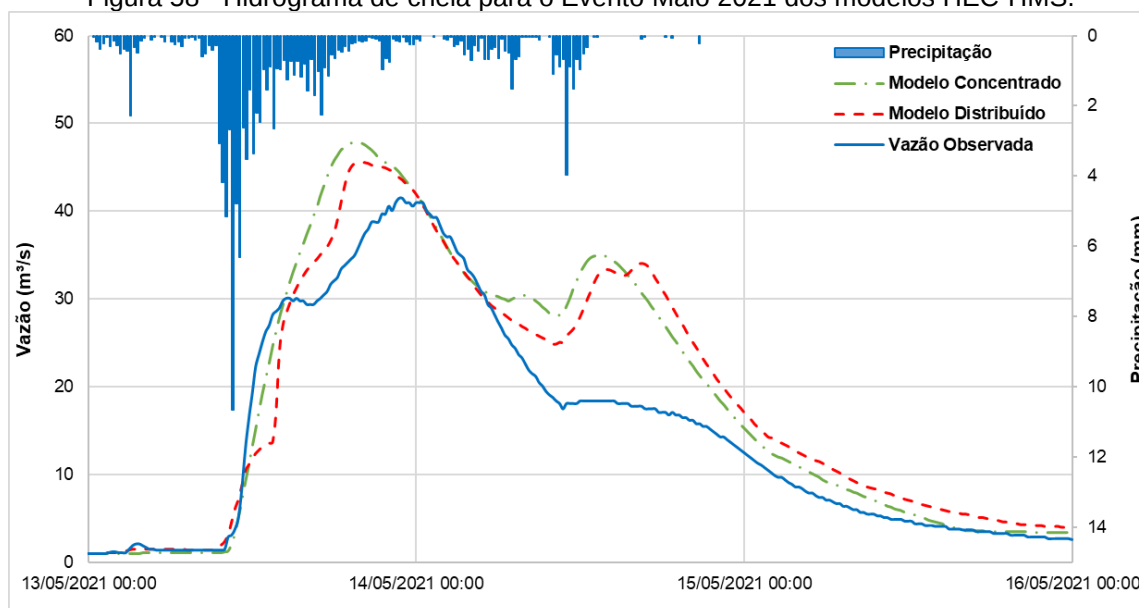
Os hidrogramas de validação dos eventos Julho/2015, Julho/2017, Abril/2018, Junho/2019 e Maio/2021 estão representados nas Figura 57a, Figura 57b, Figura 57c, Figura 57d e Figura 58, respectivamente.

Figura 57 – Hidrogramas de validação dos modelos HEC-HMS: a) Julho/2015, b) Julho/2017, c) Abril/2018 e d) Junho/2019.



Fonte: O Autor (2024).

Figura 58 - Hidrograma de cheia para o Evento Maio 2021 dos modelos HEC-HMS.



Fonte: O Autor (2024).

Aplicações do HEC-HMS sub-diário em bacia tropicais, como no estudo de caso de inundações rápidas na bacia do Rio Uma (LIMA NETO *et al.*, 2020), mostraram a aplicabilidade de tal modelo em tais zonas. Neste estudo, os resultados obtidos apresentaram uma grande sensibilidade as variações de intensidade de precipitação ao longo do evento, como pode ser notado as variações de amplitudes ao longo dos hidrogramas.

A análise do desempenho estatístico deste item permite afirmar que ambos os modelos hidrológicos desenvolvidos no HEC-HMS são representativos para a estimativa dos hidrogramas de cheia da Sub-bacia Moreno. Ademais, o Modelo Concentrado apresentou ajuste ligeiramente melhor do que o Modelo Semi-Distribuído por Sub-bacias.

5.2.6 Calibração do modelo CAWM Sub-diário

Este item apresenta o desempenho da calibração do modelo chuva-vazão sub-diário, com passo de tempo de 15 minutos, desenvolvido no CAWM V. Os parâmetros de entrada referentes às características físicas da bacia estão disponíveis na Tabela 27.

O período de calibração da modelagem sub-diária foi entre os dias 27/05/2022 e 29/05/2022, com cerca de 193 observações de dados pluviométricos e fluviométricos.

A função objetivo utilizada maximizou a relação NSE/MAE (desvio médio absoluto entre as vazões medidas e simuladas), conforme as recomendações de Campos (2023). Os parâmetros variaram dentro dos intervalos fornecidos na metodologia a fim de encontrar a solução ótima. Os coeficientes otimizados estão presentes na Tabela 46.

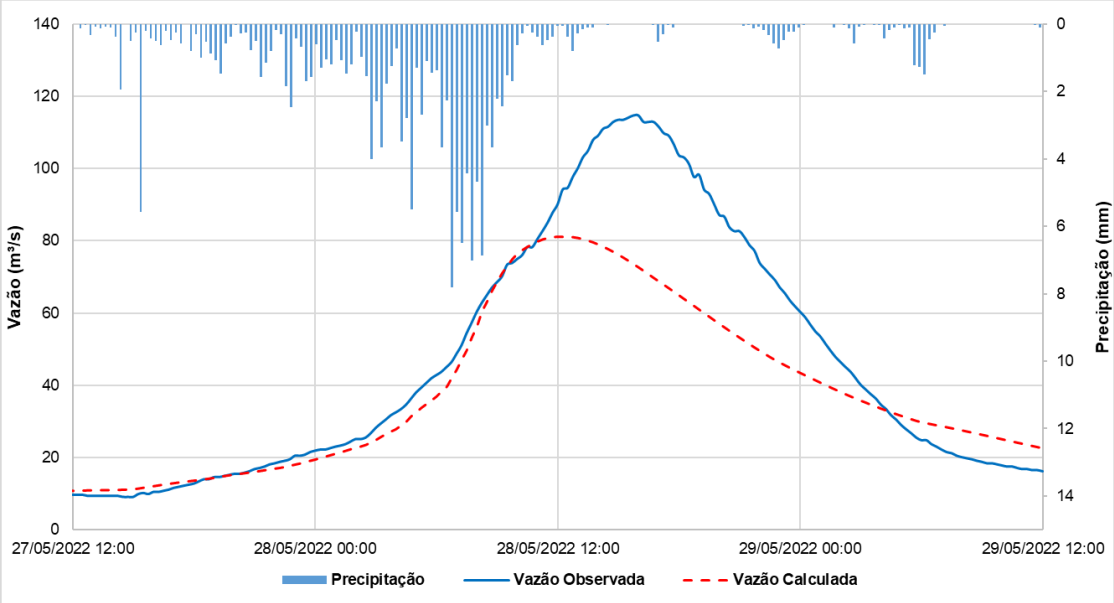
Tabela 46 - Parâmetros calibrados no modelo CAWM Sub-diário.

PARÂMETROS CALIBRADOS DO CAWM SUB-DIÁRIO					
K_s	K_L	K	α	β	p
0,046179	0,460171	0,000921	5	2,054710	1

Fonte: O Autor (2024).

O hidrograma do período de calibração está presente na Figura 59, enquanto as métricas estatísticas estão presentes na Tabela 47. Ao comparar a curva da vazão observada com a calculada constata-se que o modelo representou bem as variações de amplitude. Contudo, é evidente que o pico da cheia foi subestimado, enquanto o valor medido foi de 114,60 m³/s, a simulação superou 81,00 m³/s. A vazão média observada durante o período de calibração foi de 46,51 m³/s enquanto o valor calculado foi de 38,42 m³/s.

Figura 59 - Hidrograma de calibração do modelo CAWM Sub-diário.



Fonte: O Autor (2024).

Tabela 47 - Indicadores de performance estatística da calibração do modelo CAWM Sub-diário.

RSR	NSE	PBIAS
0,49	0,76	-17,40%

Fonte: O Autor (2024).

Ao classificar o desempenho de calibração com as métricas estatísticas conforme Moriasi *et al.* (2007), observa-se que o NSE e o RSR foram classificados como Muito Bom enquanto o Pbias foi Satisfatório.

5.2.6.1 Validação do modelo CAWM Sub-diário

Este item apresenta os resultados da validação do modelo chuva-vazão sub-diário desenvolvido no CAWM. O desempenho e classificação estatística estão dispostos na Tabela 48.

Tabela 48 - Desempenho estatístico da validação do modelo CAWM Sub-diário.

Evento	RSR	NSE	PBIAS
Julho/2015	0,44 Muito Bom	0,81 Muito Bom	7,17% Muito Bom
Julho/2017	0,51 Bom	0,74 Bom	-24,39% Satisfatório
Abril/2018	0,51 Bom	0,74 Bom	21,94% Satisfatório
Junho/2019	0,39 Muito Bom	0,85 Muito Bom	37,68% Insuficiente
Maio/2021	0,43 Muito Bom	0,81 Muito Bom	26,54% Insuficiente
Média	0,46 Muito Bom	0,79 Muito Bom	13,79% Bom

Fonte: O Autor (2024).

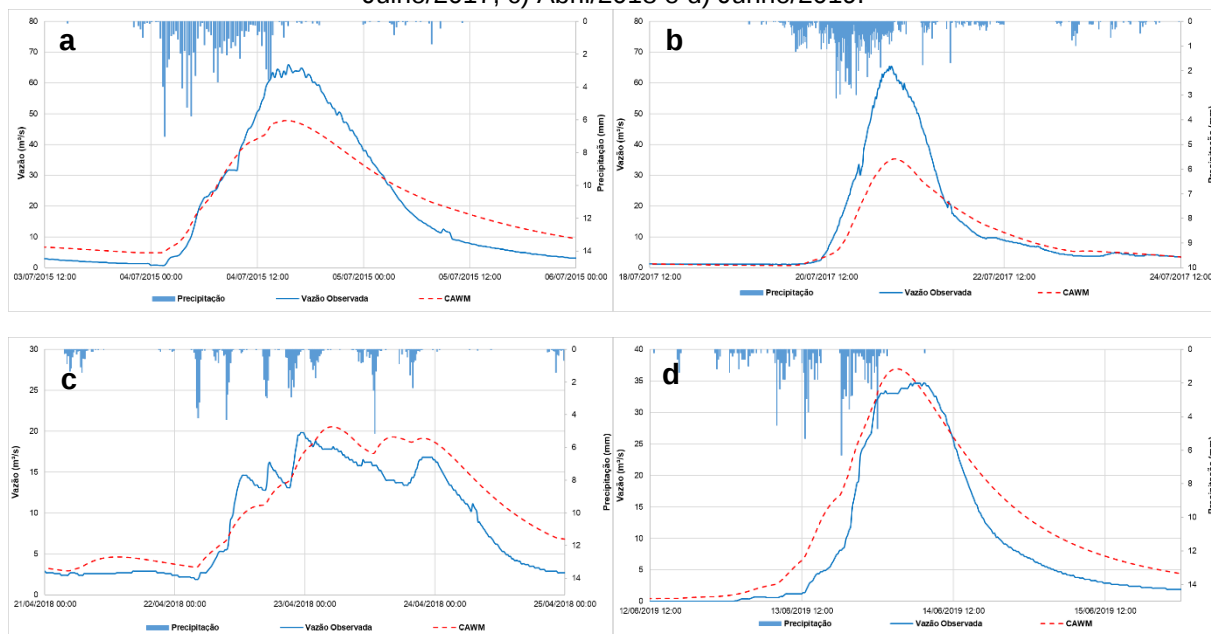
O desempenho do NSE e RSR foi classificado como Bom/Muito Bom em todos os cenários, visto que a função objetivo maximizou a relação entre o NSE/MAE para obter os parâmetros otimizados. Contudo, o Pbias foi classificado como insatisfatório nos eventos Junho/2019 e Maio/2021, nos quais é possível identificar a superestimação das vazões médias.

O modelo apresentou melhor performance em Julho/2015, cenário que houve ajuste consistente das vazões médias e subestimação do pico de cheia. O evento Julho/2017 obteve comportamento semelhante, contudo as observações registraram um pico de 65,4 m³/s enquanto foi estimado 35,36 m³/s. Tal variação influenciou no valor do Pbias, que ficou próximo do limite superior da classe Satisfatório.

Graficamente, a vazão de pico foi bem representada nos cenários Abril/2018, Junho/2019 e Maio/2021

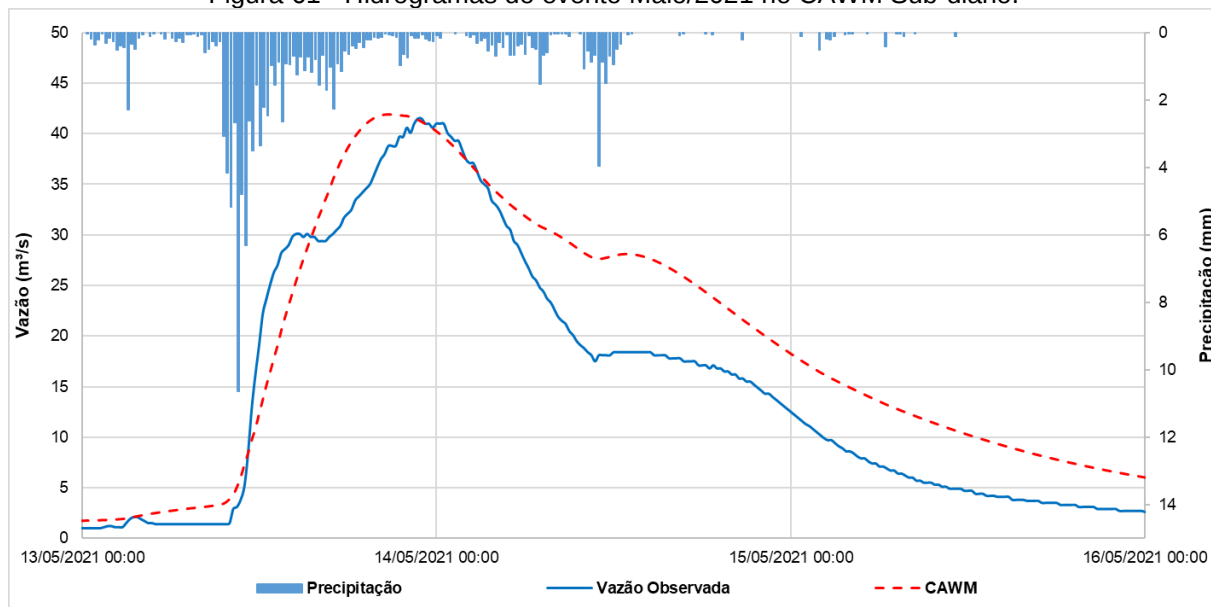
Os hidrogramas de validação dos eventos estão representados na Figura 60 e Figura 61, respectivamente.

Figura 60 - Hidrogramas de validação do CAWM Sub-diário nos eventos: a) Julho/2015, b) Julho/2017, c) Abril/2018 e d) Junho/2019.



Fonte: O Autor (2024).

Figura 61 - Hidrogramas do evento Maio/2021 no CAWM Sub-diário.



Fonte: O Autor (2024).

O desempenho médio do CAWM V sub-diário da calibração e validação foi Muito Bom para o RSR e NSE e Bom para o PBIAS. Portanto, é possível afirmar que o Modelo Sub-diário desenvolvido no CAWM é representa o escoamento superficial da Sub-bacia da Estação Moreno com desempenho estatístico “Muito Bom”.

5.2.7 Comparação de desempenho entre os modelos sub-diários

A performance do modelo concentrado desenvolvido no HEC-HMS foi comparada com a versão sub-diária do CAWM V nos mesmos cenários, o desempenho estatístico está presente na Tabela 49.

Tabela 49 - Indicadores de performance estatística dos modelos sub-diários avaliados nos mesmos cenários.

Evento	Modelo	RSR	NSE	PBIAS
Julho/2015	HEC-HMS	0,3	0,925	-9,80%
	CAWM	0,44	0,81	7,17%
Julho/2017	HEC-HMS	0,4	0,823	-24,15%
	CAWM	0,51	0,74	-24,39%
Abril/2018	HEC-HMS	0,6	0,589	14,34%
	CAWM	0,51	0,74	21,94%
Junho/2019	HEC-HMS	0,4	0,821	17,13%
	CAWM	0,39	0,85	37,68%
Maio/2021	HEC-HMS	0,5	0,748	23,63%
	CAWM	0,43	0,81	26,54%
2022	HEC-HMS	0,5	0,716	24,99%
	CAWM	0,47	0,78	-18,77%
Calibração	HEC-HMS	0,4	0,828	4,20%
	CAWM	0,49	0,76	-17,40%
Média	HEC-HMS	0,443	0,779	7,19%
	CAWM	0,463	0,784	4,68%

Fonte: O Autor (2024).

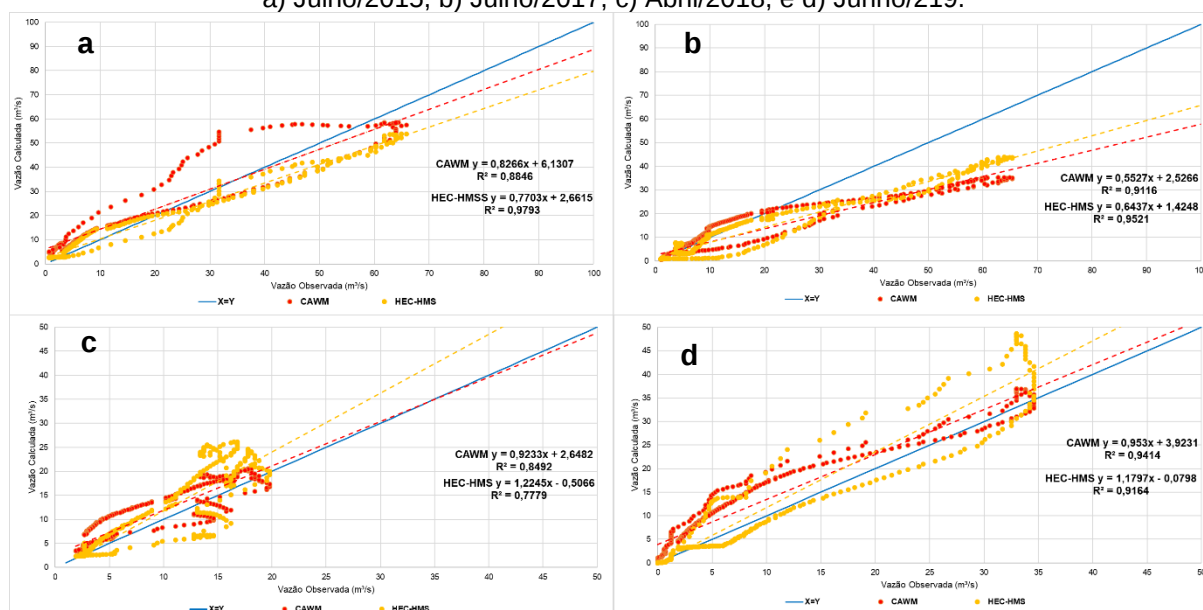
De forma geral, ambos os modelos apresentaram desempenho semelhantes em todos os cenários, com NSE médio classificado como Muito Bom e variações nos valores de Pbias.

Assim como no estudo de Campos (2023), este estudo sofre com a limitação da falta de dados de telemetria, que impede a criação de longas séries de dados com maior resolução temporal.

O HEC-HMS possui algumas vantagens em relação ao CAWM, desde a presença de um módulo GIS e maior capacidade de armazenamento de dados. Visto que o limite de células do EXCEL compromete a capacidade do CAWM em simular longos períodos com discretizações temporais menores do que 24 horas, devido as operações que podem superar o limite de linhas disponíveis na planilha.

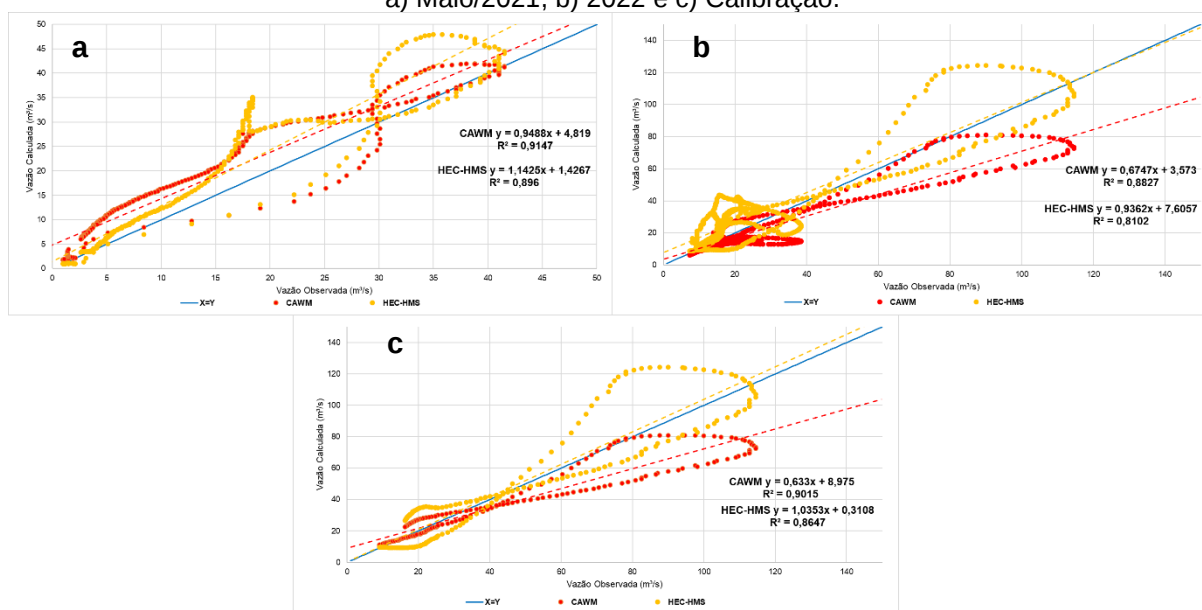
Ao comparar as vazões observadas com as vazões calculadas é possível observar a dispersão dos valores estimados ao longo da amplitude das observações. Este método foi empregado no estudo de Mo *et al.* (2024) quanto mais próximo de 1 o valor do coeficiente de determinação e de inclinação da reta, melhor o ajuste. Ao aplicar a este método ao longo e toda a série histórica (Figura 62 e Figura 63) é possível observar diferentes padrões em cada cenário observado.

Figura 62 - Comparação entre as vazões observadas e calculadas nos modelos HEC-HMS e CAWM: a) Julho/2015, b) Julho/2017, c) Abril/2018, e d) Junho/219.



Fonte: O Autor (2024).

Figura 63 - Comparação entre as vazões observadas e calculadas nos modelos HEC-HMS e CAWM: a) Maio/2021, b) 2022 e c) Calibração.



Fonte: O Autor (2024).

Nos eventos Julho/2015 e Julho/2017 ambos os modelos superestimaram as baixas vazões e subestimaram os valores máximos.

Nos eventos Abril/2018, Junho/2019 e Maio/2021 ambos os modelos superestimaram as vazões. Enquanto no evento de Calibração e 2022 a linha de tendencia do HEC-HMS foi próxima da linha da vazão enquanto o CAWM subestimou as vazões máximas.

5.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL NO MODELO CAWM V

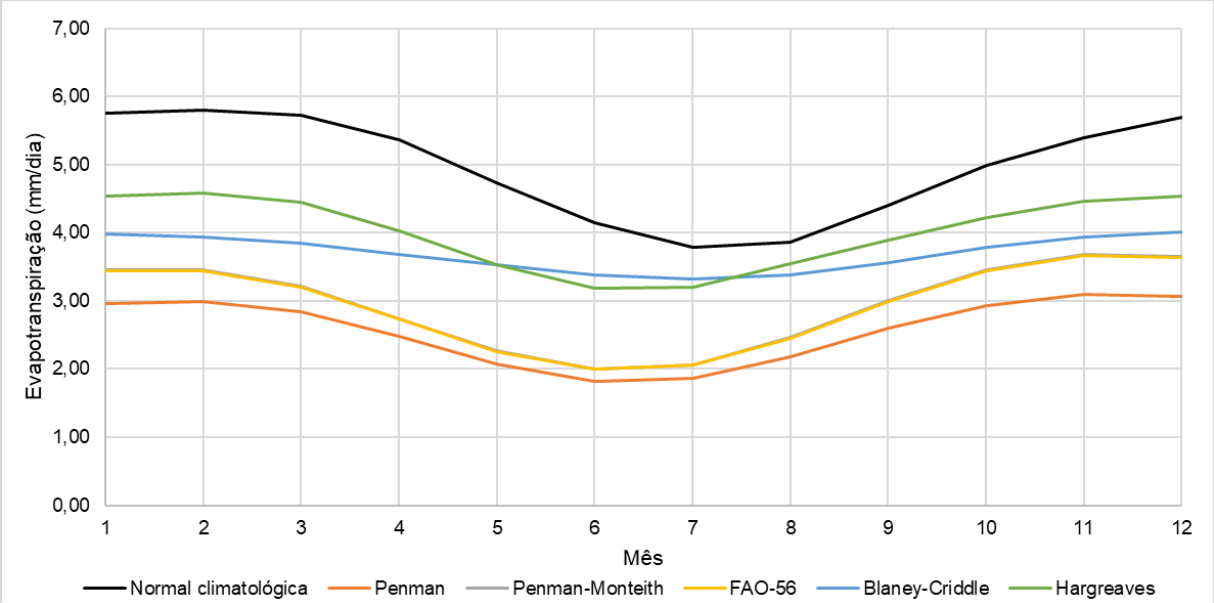
A performance do modelo CAWM V foi avaliado em diferentes cenários de evapotranspiração avaliados por meio da biblioteca *pyet*. As médias diárias para cada mês da normal climatológica e dos métodos escolhidos estão presentes na Tabela 50 e Figura 64.

Tabela 50 - Médias diárias de evapotranspiração potencial avaliadas no CAWM V.

Mês	Normal climatológica (mm/dia)	Penman (mm/dia)	Penman-Monteith (mm/dia)	FAO-56 (mm/dia)	Blaney-Criddle (mm/dia)	Hargreaves (mm/dia)
Janeiro	5,76	2,96	3,46	3,45	3,99	4,54
Fevereiro	5,85	2,99	3,46	3,44	3,94	4,58
Março	5,73	2,84	3,22	3,20	3,84	4,45
Abril	5,36	2,48	2,74	2,73	3,68	4,03
Maio	4,73	2,08	2,27	2,26	3,53	3,53
Junho	4,14	1,82	2,00	1,99	3,38	3,18
Julho	3,78	1,86	2,06	2,05	3,32	3,20
Agosto	3,87	2,18	2,46	2,45	3,39	3,54
Setembro	4,41	2,60	3,00	2,99	3,57	3,90
Outubro	4,99	2,93	3,45	3,44	3,78	4,22
Novembro	5,40	3,10	3,69	3,67	3,93	4,46
Dezembro	5,70	3,07	3,65	3,64	4,01	4,54

Fonte: O Autor (2024).

Figura 64 - Comparação entre a normal climatológica de evapotranspiração potencial com diferentes modelos.



Fonte: O Autor (2024).

Todos os modelos subestimaram os valores de evapotranspiração potencial. Observa-se que há semelhanças no comportamento da evapotranspiração ao longo do ano, com menores valores observados nos meses de outono-inverno.

Ao alterar os valores de evapotranspiração potencial, é possível identificar o impacto no balanço hídrico entre os anos de 2015 e 2022, Tabela 51.

Tabela 51 - Balanço Hídrico do CAWM em diferentes cenários de evapotranspiração potencial.

BALANÇO HÍDRICO	Normal	Penman	Penman-Monteith	FAO-56	Blaney-Criddle	Hargreaves
Evaporação potencial (mm)	14.512,98	7.511,49	8.619,29	8.586,35	11.715,03	10.792,09
Evaporação real máxima (mm)	6.174,41	6.174,41	6.174,41	6.174,41	6.174,41	6.174,41
Lâmina Q obs (mm)	3.412,64	3.412,64	3.412,64	3.412,64	3.412,64	3.412,64
Volume precipitado (mm)	9.587,05	9.587,05	9.587,05	9.587,05	9.587,05	9.587,05
Evap real (mm)	6.936,92	4.720,52	5.058,32	5.047,50	6.205,88	6.073,07
Escoado (mm)	3.813,19	4.379,45	4.252,96	4.256,95	4.033,20	4.173,77
Armazenamento superficial início (mm)	1,17	1,18	1,18	1,18	1,17	1,18
Armazenamento superficial final (mm)	4,52	6,14	5,86	5,86	5,08	5,16
Perdas (mm)	-1.230,12	349,65	148,95	155,47	-743,60	-754,77
Balanço (mm)	0,03	-0,03	0,01	0,00	0,02	0,02
Vazão média observada (m ³ /s)	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23
Vazão média calculada (m ³ /s)	1,37	1,58	1,53	1,53	1,45	1,50
NSE	0,67	0,63	0,64	0,64	0,66	0,63
PBIAS	11,74	28,33	24,62	24,74	18,18	22,30
RMSE	1,81	1,92	1,88	1,88	1,83	1,90

Fonte: O Autor (2024).

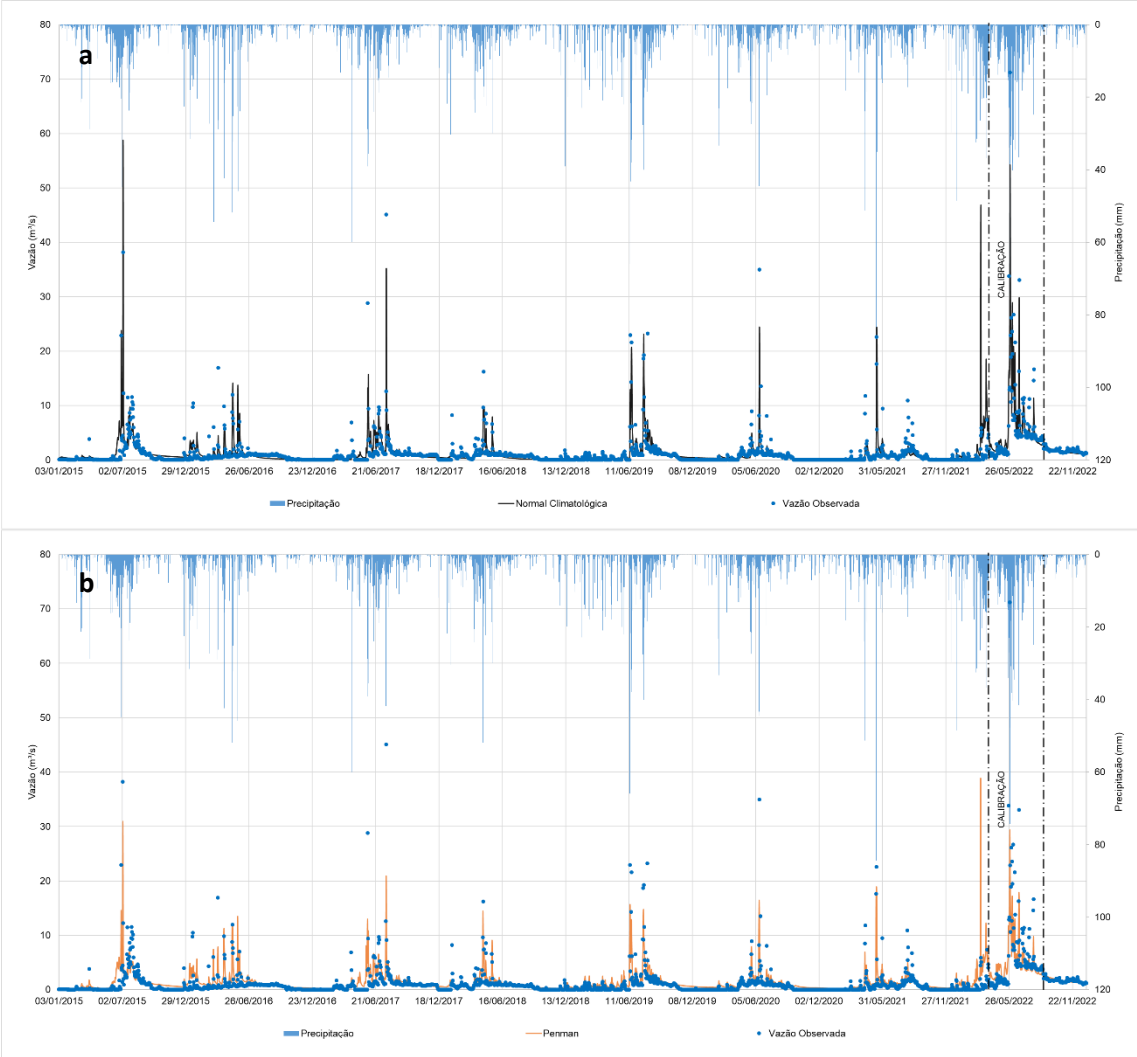
Assim como demonstrado na Figura 64, observa-se que os valores de evapotranspiração potencial foram maiores para a Normal climatológica, seguida por Blaney-Criddle, Hargreaves, Penman-Monteith, FAO-56 e Penman. As expressões do CAWM utilizam os valores potenciais para estimar a evapotranspiração imediata e o valor evaporado do solo, nos quais o seu somatório resulta no valor real evaporado, é evidente que os maiores valores foram observados com a Normal e os menores com o modelo Penman.

Os resultados do balanço hídrico permitem observar que quanto maior for o potencial de evapotranspiração menor será o volume escoado. Os valores negativos das perdas indicam que houve entrada de água por outros meios além da precipitação, como o escoamento subsuperficial nos lençóis freáticos.

As vazões médias calculadas foram mais próximas das observações nos cenários de maior evapotranspiração potencial. O ajuste do NSE foi Satisfatório em todos os cenários. A série sintética do modelo Blaney-Criddle teve o desempenho mais próximo dos dados coletados da Estação Curado.

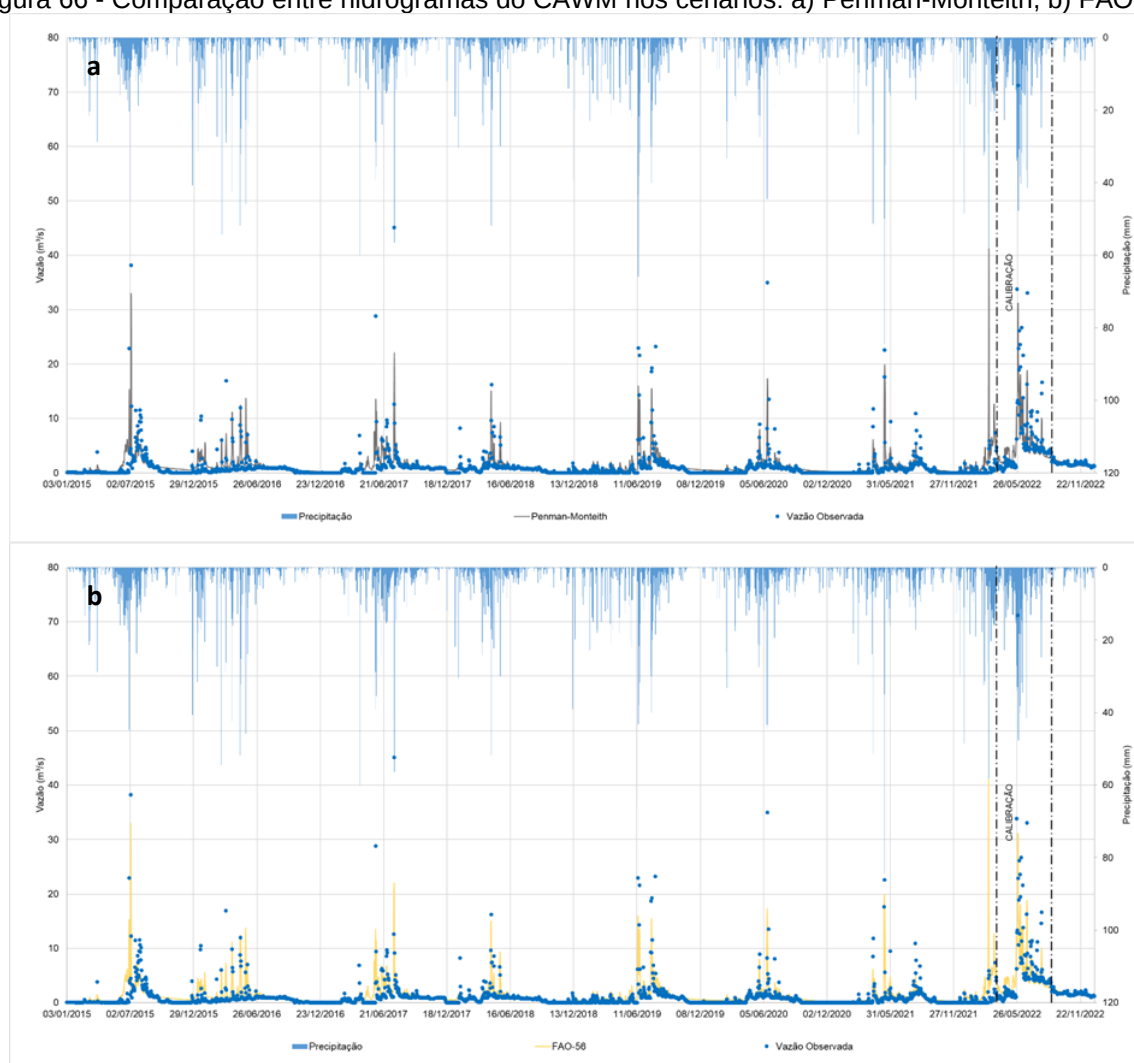
Os hidrogramas de vazão em diferentes cenários de evaporação potencial estão dispostos nas Figura 65, Figura 66 e Figura 67.

Figura 65 - Comparação entre hidrogramas do CAWM nos cenários: a) Normal Climatológica, b) Penman.



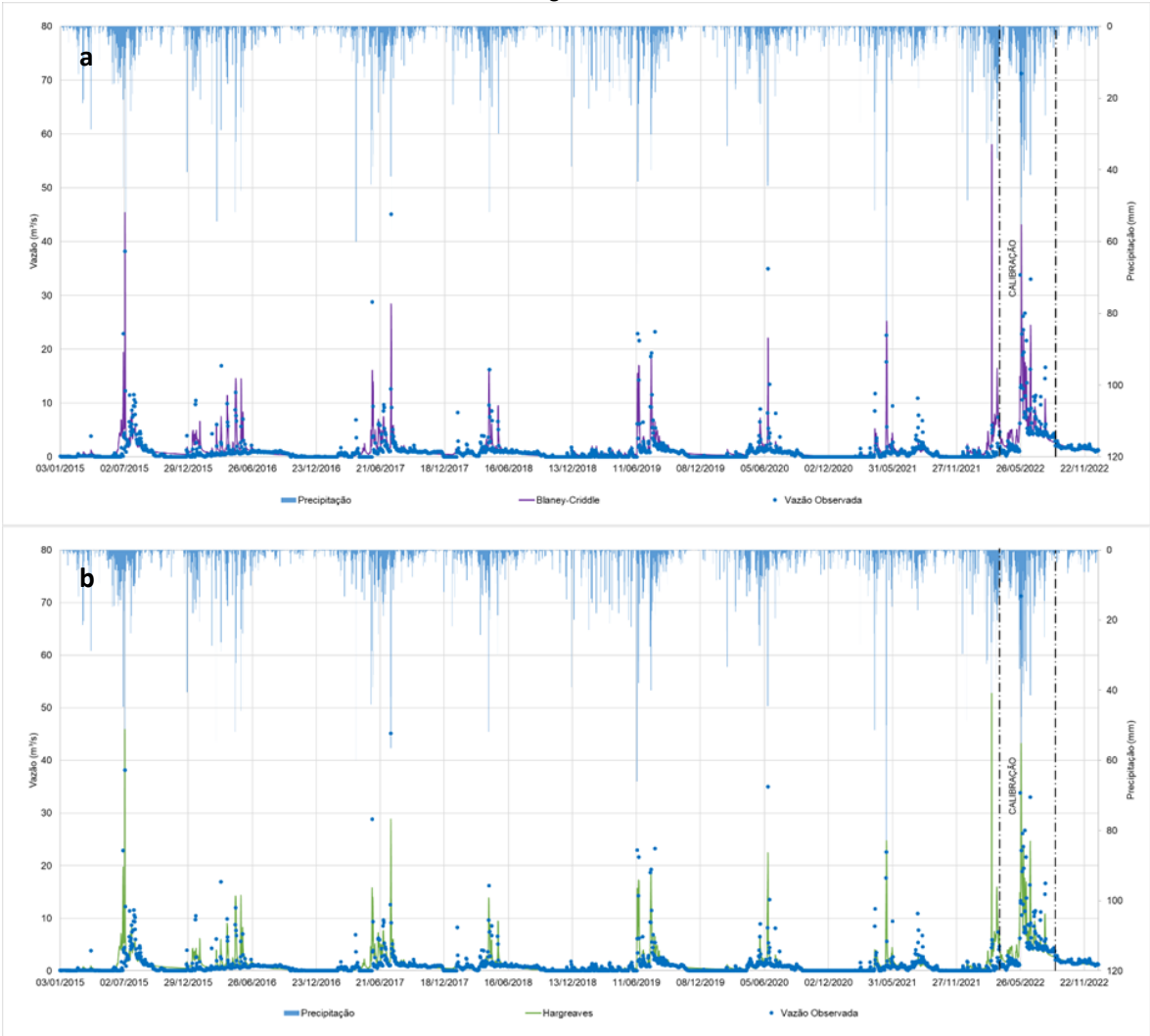
Fonte: O Autor (2024).

Figura 66 - Comparação entre hidrogramas do CAWM nos cenários: a) Penman-Monteith, b) FAO-56.



Fonte: O Autor (2024).

Figura 67 - Comparação entre hidrogramas do CAWM nos cenários: a) Blaney-Cridle, b) Hargreaves.



Fonte: O Autor (2024).

6 CONCLUSÕES

Em síntese, este estudo permitiu parametrizar os componentes atuantes no ciclo hidrológico da BHRJ através da calibração e validação de modelos chuva-vazão. Os dados fluviométricos da Estação Fluviométrica Moreno (39189560) permitiram desenvolver modelos diários e sub-horários de sua sub-bacia.

A coleta e tratamento dos dados espaciais permitiram descrever precisamente as características físicas da área de estudo. Destacando-se o MDT de alta resolução espacial do PE3D, que permitiu obter as características morfológicas da bacia e da sua rede de drenagem com precisão. Sendo fundamental para a subdivisão da área analisada em sub-bacias e da estimativa de parâmetros como o tempo de concentração.

A Coleção 8 da base de dados de cobertura do solo do MapBiomas junto com a Feição Pedológica Multiescalar (ANA, 2017) mostraram-se suficientes para a estimativa do SCS *Curve-Number* da área de estudo. Além de discretizar em classes de uso e solo da região. A área analisada é predominante rural com 35,26% de Agricultura, 21,30% de Monocultura de Cana de Açúcar e 21,54% de Área Florestal. Os grupos hidrológicos do solo C e D juntos correspondem a 64,25% da área, que indica a baixa infiltração d'água no solo. Ao combinar tais dados, o CN médio para a Sub-bacia da Estação Moreno foi de 73.

Dos 7 tipos de modelos hidrológicos avaliados, apenas o HYMOD e HBV obtiveram performance estatística insatisfatória.

Dentre os sistemas desenvolvidos, a modelagem com intervalo de tempo de 15 minutos realizada no HEC-HMS destaca-se por seu desempenho estatístico Muito Bom, com NSE de 0,828 para o Modelo Concentrado e 0,819 para o Modelo Semi-distribuído por sub-bacia. Esta modelagem apresentou ótimo desempenho na estimativa de picos de vazão durante os eventos analisados, sendo com o ajuste estatístico do Modelo Concentrado ligeiramente melhor.

O CAWM V destaca-se pela integração de dados coletados de geoprocessamento com as ferramentas de otimização do EXCEL. Neste estudo, foi avaliado o desempenho das simulações para diferentes passos de tempo. O modelo Diário apresentou NSE de calibração igual a 0,84, enquanto no Sub-diário o valor foi 0,76.

O CAWM foi originalmente desenvolvido como um modelo chuva-vazão diário, contudo as adaptações e recomendações propostas por Campos (2023) permitiram ampliar a aplicabilidade para discretizações temporais menores que 24 horas. Os resultados neste estudo obtiveram performance estatística classificada como Muito Bom.

Os modelos sub-diários obtiveram desempenho estatístico semelhante em todos os cenários. O HEC-HMS destaca-se pela integração com seu módulo de geoprocessamento e variedade de metodologias. Enquanto o CAWM tem como vantagem o uso de ferramentas de otimização do EXCEL para a calibração dos parâmetros do modelo.

De forma geral, o NCRRT requer apenas os dados de precipitação, vazão e evapotranspiração potencial para estimar os parâmetros do modelo selecionado por meio de otimizações. Dentre os modelos, o GR5J destacou-se em séries de durações mensais, enquanto o GR6J superou os demais em cenários maiores do que 1 mês.

O CAWM Diário se destacou em relação aos demais em simulações de longos períodos. Contudo, ao avaliar com o NCRRT nos mesmos eventos, observa-se que o GR5J teve o melhor desempenho, seguido pelo CAWM V e o GR6J com performance semelhante e o GR4J. Contudo, a modelagem no CAWM V requer alguns dados obtidos por geoprocessamento para a estimativa das variáveis de calibração, enquanto o NCRRT trabalhava de forma semelhante a uma correlação entre a vazão e a precipitação. Dessa forma, o CAWM parametriza as características hidrológicas a bacia, enquanto o NCRRT otimiza tais parâmetros com base em poucas informações morfológicas da bacia.

Ao analisar o balanço hídrico do CAWM V em diferentes cenários de evapotranspiração potencial, foi observado que o modelo Blaney-Criddle apresentou comportamento semelhante aos valores estimados com os dados da Normal climatológica da Estação Curado.

Neste estudo, todos os materiais e dados utilizados, incluindo MDT, série de dados hidrológicos, mapas de cobertura e tipos de solo, *software* GIS e modelos hidrológicos, estão disponíveis gratuitamente ao público. Isto torna a metodologia descrita e apresentada aqui uma ferramenta valiosa para a elaboração de estudos hidrológicos.

O autor espera que os dados aqui apresentados possam ser utilizados para o desenvolvimento de sistemas de alerta e previsão de cheias e para o planejamento dos recursos hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Jaboatão.

REFERÊNCIAS

ABIB, V. C. O. *et al.* **Mapeamento de áreas inundáveis através de sensoriamento remoto: análise de incertezas.** 2023.

ANA - Agência Nacional De Águas. **Pedologia.** 2017. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/ffeb6007-b741-4099-9889-5d50b3cd4168>. Acesso em: 22/05/2023.

AGHAKOUCHAK, A.; HABIB, E. **Application of a conceptual hydrologic model in teaching hydrologic processes.** International Journal of Engineering Education, v. 26, n. 4 (S1), p. 963-973, 2010.

ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. **Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas.** Revista da FAE, v. 20, n. 1, p. 129-137, 2017.

ANJINHO, P. S.; BARBOSA, M. A. G. A.; SANTOS, A. R.; MAUAD, F. F. **Espacialização do Parâmetro Curve Number (CN) na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Lobo para o período de 1985 e 2017.** In: XVI SIMPÓSIO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DA ENGENHARIA AMBIENTAL, 2018, São Carlos. Anais [...]. São Paulo: PPG-SEA, 2009. 12 p.

ARNOLD, J. G. *et al.* **SWAT: Model use, calibration, and validation.** Transactions of the ASABE, v. 55, n. 4, p. 1491-1508, 2012.

ÁRVORE ÁGUA. **Tipos de chuva.** 2023. Disponível em: <https://arvoreagua.org/ciclo-hidrologico/tipos-de-chuva>. Acesso em: 19/03/2024.

ÁVILA, L.; SILVEIRA, R.; CAMPOS, A.; ROGISKI, N.; GONÇALVES, J.; SCORTEGAGNA, A.; FREITA, C.; AVER, A.; FAN, F. Comparative evaluation of five hydrological models in a large-scale and tropical river basin. **Water**, v. 14, n. 3013, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w14193013>. Acesso em: 16 mai. 2024.

BARBALHO, F. D.; FORMIGA, K. T. M.; TEIXEIRA, M. M. **Comparação entre três técnicas de interpolação no cálculo da chuva média de eventos extremos**. In: XIX SBRH - SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 27 nov. 2011 a 01 dez. 2011, Maceió, AL. Anais... Maceió: [s.n.], 2011. Disponível em: https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/153/07a849a7db0dbf915d18d8ee7f25bf08_e78cd9627e9f86ffc4baf3c7b30e97c3.pdf. Acesso em: 12/01/2024.

BARBERO, Renaud et al. A synthesis of hourly and daily precipitation extremes in different climatic regions. *Weather and Climate Extremes*, v. 26, p. 100219, 2019.

BARBOSA, P. I. G. **Modelagem hidráulica com base em dois modelos hidrológicos como subsídio à predição de eventos de cheias na bacia do Rio Jucu Braço Sul/ES**. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, 2020. Orientador: Prof. Marco Aurélio Costa Caiado, PhD.

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. **Precipitação**. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). *Hidrologia: ciência e aplicação*. 4ª ed. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)/Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRHidro), 2013. Capítulo 5, p. 1832 1.

BERTOUX, L.; ROMERO, D. G. **Vulnerabilidad y resiliencia urbana frente al cambio climático: el caso de la zona metropolitana de Guadalajara, México**. *Urbano*, p. 24-31, 2015.

BESKOW, S. *et al.* Estimativa do escoamento superficial em uma bacia hidrográfica com base em modelagem dinâmica e distribuída. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 169-178, 2009.

BOYLE, D. P.; GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S. **Toward improved calibration of hydrologic models: combining the strengths of manual and automatic methods**. *Water Resour Res* 36:3663–3674, 2000.

BRANDÃO, V. S. *et al.*, **Infiltração da Água no Solo**. 3. Ed Viçosa: UFV, 2006.

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997.** Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 9 jan. 1997.

BRIGHENTI, T. M.; BONUMÁ, N. B.; GRISON, F.; MOTA, A. A.; KOBİYAMA, M.; CHAFFE, P. L. B. **Two calibration methods for modeling streamflow and suspended sediment with the swat model.** *Ecological Engineering*, [s.l.], v. 127, p.103-113, fev. 2019.

BURROUGH, P. A.; MCDONELL, R. A. **Principles of Geographical Information Systems.** Oxford: Oxford University Press, 1998. v. 333.

CAMARGO, A. Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 21, p. 163-213, 1962.

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. **Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial.** *Bragantia*, v. 59, p. 125-137, 2000.

CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. B. **Hidrologia.** 2006. Apostila. Disponível em: https://www.academia.edu/33201508/HIDROLOGIA_CAP%C3%8DTULO_1_INTRODU%C3%87%C3%83O_%C3%80_HIDROLOGIA. Acesso em: 05 nov. 2023.

CAMPOS, M. L. C. **Aperfeiçoamento e aplicação de modelo hidrológico chuva-vazão para simulação sub-diária de eventos de cheias.** 2023. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

CEMADEN. **Inundação.** 2016. Disponível em: <http://www2.cemaden.gov.br/inundacao/>. Acesso em: 19/03/2024.

CHAVES, João Victor Bezerra. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica com geração de mapas de perigo de inundação na Bacia do Tapacurá.** 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.

CHOW, V. T. C.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied hydrology**. 2. ed. New York: McGraw-Hill Higher Education, 1988.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1980.

CIRILO, J. A. **Modelos CAWM IV e V – Memorial descritivo**. 2021. Disponível em: <https://www.ufpe.br/web/grh>. Acesso em: 13/01/2024.

CIRILO, J. A. Desenvolvimento e aplicação de modelo chuva-vazão para regiões semiáridas. **RBRH**, v. 25, p. e15, 2020.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. 2013.

COSTA, M. F. **Geografia física: o meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005.

COUTINHO, A. P. **Pavimento permeável como técnica compensatória na drenagem urbana da cidade do Recife**. 2011. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

CUNGE, J. A. On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method). **Journal of Hydraulic Research**, [s.l.], v. 7, n. 2, p. 205-230, 1969.

CUNHA, S. B. **Geomorfologia Fluvial**. In: GUERRA, A. T. G. & CUNHA, S. B. (org.). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 7.ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007. Cap. 5, p 211-252.

CUNHA, S. F. *et al.* Avaliação da acurácia dos métodos do SCS para cálculo da precipitação efetiva e hidrogramas de cheia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 837-848, 2015.

DANG, Thanh Duc; CHOWDHURY, AFM Kamal; GALELLI, Stefano. On the representation of water reservoir storage and operations in large-scale hydrological

models: implications on model parameterization and climate change impact assessments. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 24, n. 1, p. 397-416, 2020.

DARBANDSARI, Pedram; COULIBALY, Paulin. Inter-comparison of lumped hydrological models in data-scarce watersheds using different precipitation forcing data sets: Case study of Northern Ontario, Canada. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 31, p. 100730, 2020.

FERRAZ, Gadadhara de Figueiredo. **Simulação hidrológica e hidrodinâmica do impacto de enchentes na bacia do rio Sirinhaém e avaliação de sistema de controle proposto**. 2019. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

FLORES, Neftali *et al.* Comparison of three daily rainfall-runoff hydrological models using four evapotranspiration models in four small forested watersheds with different land cover in South-Central Chile. *Water*, v. 13, n. 22, p. 3191, 2021.

FRAGA, Y. S. B. *et al.* A Influência da Evapotranspiração na Engenharia Civil. **Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-SERGIPE**, v. 3, n. 3, p. 25-25, 2016.

FRAGOSO JR, C. R.; FERREIRA, T. F.; DA MOTTA MARQUES, D. **Modelagem ecológica em ecossistemas aquáticos**. Oficina de textos, 2009.

GHARARI, S. *et al.*, An approach to identify time consistent model parameters: sub-period calibration. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, n. 1, p. 149-161, 2013.

GOMES, S. C. *et al.* **Diagnóstico ambiental do meio físico da bacia hidrográfica do rio Jaboatão-PE**. 2005. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

HAWKINS, R. H.; WARD, T. J.; WOODWARD, D. E.; VAN MULLEM, J. A. **Curve Number Hydrology: State of the Practice**. 2. ed. [s.l.]: ASCE/EWRI, 2009. 106 p.

HORTON, Pascal; SCHAEFLI, Bettina; KAUZLARIC, Martina. Why do we have so many different hydrological models? A review based on the case of Switzerland. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, v. 9, n. 1, p. e1574, 2022.

IBGE; CEMADEN. **População em áreas de risco no Brasil**. 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias-novoportal/organizacao-do-territorio/tipologias-do-territorio/21538-populacao-em-areas-de-risco-no-brasil.html?=&t=acesso-ao-produto>. Acesso em: 15/11/2023.

IBGE. **População em áreas de risco no Brasil | 2010**. 2018. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/estudos-ambientais/21538-populacao-em-areas-de-risco-no-brasil.html?=&t=acesso-ao-produto>. Acesso em: 27 nov. 2022.

ILVA, J. A. **Hidrologia básica**. 2000. São Paulo: Edusp.

JULANDER, R. P.; CLAYTON, J. A. Determining the proportion of streamflow that is generated by cold season processes versus summer rainfall in Utah, USA. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 17, n. 101823, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101823>.

KIRPICH, T.P. Time of Concentration of Small Agricultural Watersheds. **J. of Civ. Eng.**, v.10, n.6, p. 362, 1940.

LAGHARI, T.; KHALIQ, A.; SHAH, S.; ALI, S.; SHAHZAD, H. Analysis of rainfall data to estimate rain contribution towards crop water requirement using cropwat model. **Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences**, v. 12, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.18551/rjoas.2014-12.02>. Acesso em: 22/03/2024.

LE MOINE, N. **Le bassin versant de surface vu par le souterrain: une voie d'amélioration des performances et du réalisme des modèles pluie-débit**. 2008.

Tese de Doutorado. Doctorat Géosciences et Ressources Naturelles, Université Pierre et Marie Curie Paris VI.

LIMA NETO, Otacílio Correia *et al.* Sub-daily hydrological-hydrodynamic simulation in flash flood basins: Una river (Pernambuco/Brazil). **Revista Ambiente & Água**, v. 15, p. e2556, 2020.

LIMA, R. R. M. **Estudo de manejo de águas pluviais urbanas na cidade Natal-Rio Grande do Norte**. 2011. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

LLOYD, C. D. Assessing the effect of integrating elevation data into the estimation of monthly precipitation in Great Britain. **Journal of Hydrology**, v. 308, n. 1-4, p. 128-150, 2005.

LOUREIRO, R. S. *et al.* Estudo dos eventos extremos de precipitação ocorridos em 2009 no estado do Pará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. spe, p. 83–94, dez. 2014.

MADHURI, R. *et al.*, Urban flood risk analysis of buildings using HEC-RAS 2D in climate change framework. **H2Open Journal**, v. 4, n. 1, p. 262–275, 1 jan. 2021.

MAPBIOMAS. **Coleção 8 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil**. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/>. Acesso em: 22/01/2024.

MARENGO, José Antônio *et al.* Flash floods and landslides in the city of Recife, Northeast Brazil after heavy rain on May 25–28, 2022: Causes, impacts, and disaster preparedness. **Weather and Climate Extremes**, v. 39, p. 100545, 2023.

MCCARTHY, G. T. The unit hydrograph and flood routing. **U.S. Corps Eng.**, Providence, R.I, 1939.

MDR – Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria de Proteção e Defesa Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil. Atlas Digital de Desastres no Brasil. Brasília: MDR, 2024. Disponível em: <https://atlasdigital.mdr.gov.br/>. Acesso em: 15 set. 2024.

MELO, V. B. *et al.* Modelagem hidrológica: calibração e validação dos modelos CAWM e GR4J para uma sub-bacia do Rio Una - Pernambuco. 2021.

MIGUEZ, M. G.; MASCARENHAS, F. C. B. Modelação matemática de cheias urbanas através de um esquema de células de escoamento. **Rev. Bras. Recursos. Hídricos RBRH**, v. 4, p. 119-140, 1999.

MISHRA, S. K; SINGH, V. P. Another look at SCS-CN method. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 4, n. 3, p. 257-264, 1999.

MISHRA, S. K; SINGH, V. P. **Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology**. Springer Science & Business Media, 2013.

MO, Chongxun *et al.* Enhanced Runoff Modeling by Incorporating Information from the GR4J Hydrological Model and Multiple Remotely Sensed Precipitation Datasets. **Water**, v. 16, n. 4, p. 530, 2024.

MOCKUS, V. Use of storm and watershed characteristics in synthetic hydrograph analysis and application. In: **AGU PACIFIC SOUTHWEST REGION MEETING**, 1957, Sacramento, California. Proceedings... [S.l.: s.n.], 1957.

MONTE-MOR, R. C A. *et al.* Estabilidade temporal da distribuição espacial da umidade do solo em uma bacia intermitente no semiárido de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 3, p. 101-113, 2012.

MOREIRA, H. A. *et al.* **Diagnóstico da qualidade ambiental da Bacia do Rio Jaboatão: sugestão de enquadramento preliminar**. 2007. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 50, n. 3, pp. 885-900, 2007.

NASA. **Sensors: Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)**. 2000. Disponível em: <https://www.earthdata.nasa.gov/sensors/srtm>. Acesso em: 06/03/2024.

NASCIMENTO, M. C. *et al.* Uso do geoprocessamento na identificação de conflito de uso da terra em áreas de preservação permanente na bacia hidrográfica do rio Alegre, Espírito Santo. **Ciência Florestal**, v. 15, p. 207-221, 2005.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. **Journal Of Hydrology**, [s.l.], v. 10, n. 3, p.282- 290, abr. 1970.

Paiva, R. C. D., Collischonn, W., Kolling, A., Miranda, P. T., 2024. **Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional. CLIMA: Sensibilidade de vazões a variabilidade e mudanças climáticas – Relatório Final**. IPH-ANA-HGE-CLIMA-A2. UFRGS: IPH, [Porto Alegre]. ANA, [Brasília].

PERNAMBUCO. **Pernambuco Tridimensional**. Disponível em: <<http://www.pe3d.pe.gov.br/>>. Publicado em: 2016. Acesso em: 6 mar. 2024.

PERRIN, C.; MICHEL, C.; ANDRÉASSIAN, V. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. **Journal of hydrology**, v. 279, n. 1-4, p. 275-289, 2003.

PEZAN, Victor Faria. **Determinação do SCS-Curve Number usando dados hidrológicos observados de bacias hidrográficas brasileiras**. 2022. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022. doi:10.11606/D.18.2022.tde-14062022-163223. Acesso em: 13/03/2024.

PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos avançados**, v. 22, p. 43-60, 2008.

POSSAS, J. M. C. Impactos da urbanização em bacias hidrográficas: o caso da bacia do rio. **Fonte Hídrica**, 2011. Disponível em: <https://fontehidrica.blogspot.com/2011/11/impactos-da-urbanizacao-em-bacias.html>. Acesso em: 20/03/2024.

PUSHPALATHA, R. *et al.* A downward structural sensitivity analysis of hydrological models to improve low-flow simulation. **Journal of hydrology**, v. 411, n. 1-2, p. 66-76, 2011.

RENÓ, C. D., SOARES, J. V. Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental. **Relatório Técnico Parcial**, INEP, 2000.

ROCHA, J. S. M.; KURTS, S. M. J. M. **Manual de manejo integrado de bacias hidrográficas**. 4. ed. Santa Maria: UFSM/CCR, 2001.

RODRIGUES, C. M. **Evaporação e evapotranspiração-Capítulo 8**. 2017.

SADEGH, M. *et al.* A multi-model nonstationary rainfall-runoff modeling framework: analysis and toolbox. **Water Resources Management**, v. 33, p. 3011-3024, 2019.

SANTOS, L. L. Modelos hidrológicos: Conceitos e aplicações. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 2, n. 3, p. 1-19, 2009.

SANTOS, L. C. A. **Modelagem hidrológica de três bacias hidrográficas do alto e médio Pajeú, estado de Pernambuco**. 2023. 108 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

SCS - Soil Conservation Service. **A Method for Estimating Volume and Rate of Runoff in Small Watersheds**. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture, 1973. (SCS-TP 149).

SCS - Soil Conservation Service. **National engineering handbook**. Washington D.C.: U.S. Department of Agriculture, 1972. sec. 4.

SEZEN, Cenk et al. Hydrological modelling of karst catchment using lumped conceptual and data mining models. *Journal of Hydrology*, v. 576, p. 98-110, 2019.

SILVA, B. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, F. D.; ARAÚJO FILHO, P. D. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 3, p. 135-147, 2012.

SILVA, C. S. **Avaliação das condições hidrogeomorfológicas da bacia hidrográfica do rio Jaboatão**. 2018. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

SILVA, J. N.; CAIADO, E. S.; CAIADO, M. A. C. Escolha de parâmetro para interpolação de precipitação diária utilizando o interpolador Inverse Distance Weight (IDW), In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**, 20., 2013, Bento Gonçalves, Anais [...], Bento Gonçalves: ABRH, 2013, 8p.

SILVA, J. S. **Desenvolvimento territorial e gestão de bacia hidrográfica: o caso da bacia do rio Jaboatão, Pernambuco**. MS thesis. Universidade Federal de Pernambuco, 2013.

SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais, **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s.l.], v. 10, n. 1, p. 5-29, 2005.

SITTERSON, J. et al. **An Overview of Rainfall-Runoff Model Types**. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, EPA/600/R-17/482, 2017.

SOUSA, Á. S. A. **Modelagem hidrológica para bacias hidrográficas em regiões úmidas: aplicações do modelo campus agreste watershed model**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso.

Souza *et al.* Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine - **Remote Sensing**, Volume 12, Issue 17, 10.3390/rs12172735, 2020.

TECTERRA GEOTECNOLOGIAS. **Topografia para estudos de barragens**. 2021. Disponível em: <https://tecterra.com.br/geracao-de-topografia-para-estudos-de-barragens/>. Acesso em: 21/03/2024.

TOLENTINO JR, J. B. **Hidráulica Agrícola**. Disponível em: <https://hidraulica.tolentino.pro.br/index.html#este-livro>. Acesso em: 12/01/2024. Publicado em: 12 jun. 2023.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. EDUSP, Editora da UFRGS, ABRH, p952, 1993.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, ABRH, 1993.

TUCCI, C. E. M. **Impacto da urbanização nas cheias urbanas e na produção de Sedimentos**. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, relatório de pesquisa FAPERGS. p120, 1995.

TUCCI, C. E. M. **Águas urbanas**. Estud. av., São Paulo, v. 22, n. 63, p. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-40142008000200007>. Acesso em: 14/01/2024.

TUCCI, C. E. M. **Gerenciamento integrado das inundações urbanas no Brasil**. ABRH, 2006. 389 p. ISBN 9788588686212

TUCCI, C. E. M. Coeficiente de escoamento e vazão máxima de bacias urbanas. **RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Vol. 5, n. 1 (2000), p. 61-68, 2000.

TUCCI, C. E. M. **Gestão de águas pluviais urbanas**. Programa de Modernização do Setor Saneamento, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Ministério das Cidades, 2005.

USACE, **Hydrologic Modeling System HEC-HMS: User's Manual**, Version 4.10, United States Army Corps of Engineers – USACE, Hydrologic Engineering Center – HEC, Davis, California, EUA, 2022a, Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsum/4.10>. Acesso em: 07/10/2023.

USACE. **Hydrologic Engineering Center**. 2006. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hech-hms/documentation.aspx>. Acesso em: 07/10/2023.

USGS - United States Geological Survey. **O Ciclo da Água (Water Cycle)**. Disponível em: <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/o-ciclo-dagua-water-cycle-portuguese#overview>. Acesso em: 05/03/2024.

VANZELA, L. *et al.* Influência do uso e ocupação do solo nos recursos hídricos do Córrego Três Barras, Marinópolis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 55-64, 2010.

VASCONCELOS, Hellen Xavier Tavares. Modelagem aplicada ao planejamento dos recursos hídricos com suporte de bases de dados de alta definição espacial: aprimoramento de modelo conceitual chuva-vazão concentrado. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2020.

VIEIRA, L. **Aplicação de modelos hidrológicos com SIG em obras civis lineares**. 2015. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-06012016-092547/>. Acesso em: 12/01/2024.

VREMEC, M.; COLLENTEUR, R. A.; BIRK, S. **Technical note: Improved handling of potential evapotranspiration in hydrological studies with PyEt**. Hydrology and

Earth System Sciences Discussions*, [preprint], 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-2022-417>. Acesso em: 14/05/2024.

WASKO, Conrad et al. Evidence of shorter more extreme rainfalls and increased flood variability under climate change. *Journal of Hydrology*, v. 603, p. 126994, 2021.

WEI, T. C.; MCGUINESS, J. L. **Reciprocal distance squared method: a computer technique for estimating areal precipitation**. 1973. USDA-ARS-NC-8, pp. 1-23.

WORLD RIVERS. **Drainage Basins**. 2020. Disponível em: <https://worldrivers.net/2020/03/25/drainage-basins/>. Acesso em: 19/01/2024.